Biblioteca Digital

Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável

Coordenação BNDES e CGEE

C_2H_5OH

C_2H_5OH

Bioetanol de Cana-de-Açúcar

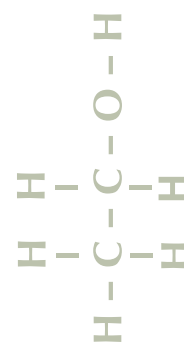
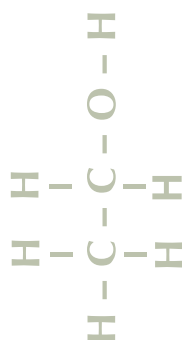
Energia para o Desenvolvimento Sustentável

C_2H_5OH

Coordenação
BNDES e CGEE

www.bioetanoldecana.org

1ª Edição

Rio de Janeiro – Novembro 2008

B615b Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável / organização BNDES e CGEE. – Rio de Janeiro : BNDES, 2008.

316 p.

ISBN: 978-85-87545-24-4

1. Bioenergia. 2. Biocombustível. 3. Bioetanol. 4. Cana-de-açúcar. I. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. II. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

CDD 333.953

Equipe Técnica

Coordenação – BNDES e CGEE

BNDES
Armando Mariante Carvalho Junior
Júlio Cesar Maciel Ramundo
Carlos Eduardo de Siqueira Cavalcanti
Paulo de Sá Campello Faveret Filho (supervisão)
Nelson Isaac Pfefer (supervisão)
Sergio Eduardo Silveira da Rosa
Artur Yabe Milanez

CGEE
Antonio Carlos Galvão
Marcelo Khaled Poppe

Organização e responsabilidade técnica
Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*

Redação e consultoria
Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*
Joaquim Eugênio Abel Seabra – *Unicamp*
Gustavo Best – *consultor FAO/Cepal*
Manoel Regis Lima Verde Leal – *Cenea*
Marcelo Khaled Poppe – *CGEE*

Colaboração institucional – Cepal e FAO

Cepal
Adrián Rodríguez
José Javier Gómez
Joseluis Samaniego
Manlio Coviello
Martine Dirven

FAO
Alberto Saucedo
Guilherme Schuetz

Agradecimentos
Adhemar Altieri – *Unica*
Alfred Szwarc – *Unica*
Aluysio Antonio da Motta Asti – *BNDES*
André Correa do Lago – *MRE*
Antonio Barros de Castro – *BNDES*
Antonio Dias Leite – *consultor*
Arnaldo Vieira de Carvalho – *BID*
Edmar Fagundes de Almeida – *UFRJ*
Isaias de Carvalho Macedo – *Unicamp*
João Carlos Ferraz – *BNDES*
Luis Augusto Barbosa Cortez – *Unicamp*
Marcio Nappo – *Unica*
Rafael Capaz – *Unifei*
Rafael Pontes Feijó – *BNDES*
Rogério Cezar de Cerqueira Leite – *Unicamp*
Tammy Klein – *IFQC*

Sumário

Índice de boxes, figuras, gráficos e tabelas

Boxes

Figuras

Gráficos

Tabelas

Prefácio

Petróleo, gás natural e seus derivados representam 55% do consumo mundial de energia. São esses combustíveis que permitem a existência dos meios de transporte rápidos e eficientes que temos hoje, bem como boa parte das atividades industriais. Lamentavelmente, eles não vão durar mais do que algumas décadas: como combustíveis fósseis, as suas reservas são finitas, a segurança de abastecimento é problemática para os muitos países que os importam e o seu uso é a principal fonte dos gases que estão provocando mudanças climáticas e o aquecimento global.

É preciso, pois, encontrar substitutos para esses combustíveis. Nada mais racional do que produzi-los com base em matéria orgânica renovável (biomassa), da qual, no passado distante, os combustíveis fósseis foram produzidos pela natureza. Uma das opções é o etanol, um excelente substituto para a gasolina, o principal combustível usado em automóveis no mundo.

No Brasil, o etanol, produzido da cana-de-açúcar, já substitui hoje metade da gasolina que seria consumida e seu custo é competitivo sem os subsídios que viabilizaram o programa no seu início. Isso foi conseguido em cerca de 30 anos a partir da criação do Proálcool, programa lançado no país em meados da década de 1970 para reduzir a dependência da importação de petróleo. Considerações econômicas da indústria do açúcar também pesaram no estabelecimento do programa, porém preocupações de caráter ambiental e social não tiveram um papel significativo na ocasião.

Nos Estados Unidos, grande produtor mundial de etanol com base no milho, o programa é mais recente e suas justificativas são a eliminação de aditivos na gasolina e a redução das emissões de gases que provocam o aquecimento global. Nos países da Europa Ocidental, o etanol produzido do trigo e da beterraba também é usado. Nesses países, o custo do etanol é duas a quatro vezes mais

elevado do que no Brasil e subsídios internos e barreiras alfandegárias protegem as indústrias locais, impedindo a importação de etanol do Brasil.

Isso tem criado resistências de alguns grupos, que associam o etanol (e o biodiesel, produzido em quantidades menores) a um falso dilema, que é o da produção de alimentos versus combustíveis. Esse argumento não se sustenta quando nos damos conta de que a produção de etanol no mundo, de cerca de 50 bilhões de litros por ano, usa 15 milhões de hectares de área, ou seja, 1% da área em uso pela agricultura no mundo, que é de 1,5 bilhão de hectares.

Argumentam esses grupos também que, na realidade, o uso de etanol não reduz as emissões de gases de efeito estufa, o que é totalmente incorreto no que se refere ao etanol da cana-de-açúcar. Esse é, de fato, praticamente renovável, uma vez que o bagaço da cana supre toda a energia necessária para a fase industrial da produção do etanol. A situação dos Estados Unidos é menos confortável porque a produção do etanol exige o uso de energia que vem quase toda do carvão. Pode-se dizer que o etanol do milho é, na realidade, carvão convertido em etanol, ao passo que no Brasil ele é quase inteiramente de energia solar.

A expansão da cultura da cana-de-açúcar e do milho envolve mudanças no uso do solo, o que pode implicar a emissão de gases de efeito estufa se a expansão resultar em desmatamento, o que não é o caso do Brasil, onde a expansão está ocorrendo sobre pastagens. De qualquer forma, esse é um problema geral de agricultura em expansão e não um problema da produção de etanol (ou biodiesel). Se há, aqui, um dilema, ele poderia ser denominado de produção de alimentos versus mudanças climáticas.

O que se pode chamar de "solução brasileira para os problemas dos combustíveis fósseis" – o uso do etanol de cana-de-açúcar para substituir a gasolina – não é exclusivo do nosso país e está sendo adotado em outros países produtores de cana-de-açúcar (dos quais existem quase cem no mundo), como Colômbia, Venezuela, Moçambique e ilhas Maurício.

Essas e outras questões são analisadas a fundo neste livro, que descreve as características biológicas da cana-de-açúcar como planta, as técnicas de produção do álcool e os seus co-produtos, como bioeletricidade, apresentando o "estado da arte" do que é chamado de "tecnologias de primeira geração".

Há, ainda, uma discussão das "tecnologias de segunda geração" para a produção de etanol com base na celulose de quaisquer outros produtos agrícolas (inclusive de cana-de-açúcar), bem como tecnologias de gaseificação de biomassa. A sustentabilidade social e ambiental de produção do etanol é também discutida.

A leitura deste livro certamente dissipará vários mitos que se formaram em torno do grande e promissor programa de etanol no Brasil e sua potencial expansão no mundo.

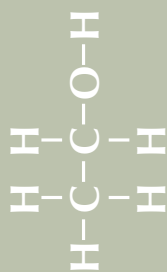
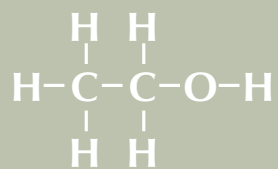
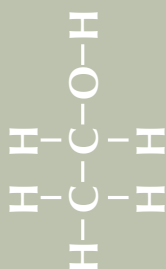
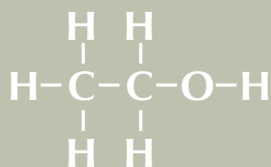
Professor José Goldemberg
Universidade de São Paulo

C_2H_5OH

C_2H_5OH

```
    H   H
    |   |
H - C - C - O - H
    |   |
    H   H
```

C_2H_5OH

```
    H   H
    |   |
H - C - C - O - H
    |   |
    H   H
```

Apresentação

O interesse mundial pelo desenvolvimento dos biocombustíveis aumentou a partir de meados da presente década, em virtude de uma preocupação maior com o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis e mais limpas, que permitam avançar na superação do atual paradigma, baseado nos combustíveis fósseis. Nesse cenário, destaca-se o Brasil, cujo programa de bioetanol de cana-de-açúcar apresenta resultados interessantes, desde a pesquisa de variedades de cana de maior rendimento até a fabricação de motores que funcionam com qualquer mistura de gasolina e etanol.

Compartilhar essa experiência e as lições dela derivadas com o resto do mundo – especialmente com países em desenvolvimento situados em zonas tropicais e subtropicais – foi a principal motivação para que o presidente Luiz Inácio Lula da Silva encomendasse ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e ao Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) a elaboração deste livro. Um interesse similar motivou a colaboração da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (Cepal) e do Escritório Regional da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para a América Latina e o Caribe.

Com a elevação dos preços das matérias-primas agrícolas e dos alimentos nos últimos anos, passou-se a questionar se uma das causas importantes para isso não seria a demanda de produtos agrícolas na fabricação de biocombustíveis. Nesse sentido, é crucial fazer a distinção entre os diferentes sistemas de produção dos biocombustíveis, considerando seus aspectos ambientais e energéticos e os possíveis trade-offs com a produção de alimentos. É preciso compreender que os biocombustíveis são bastante diferentes entre si quanto aos impactos e benefícios. Por exemplo, o bioetanol de cana-de-açúcar tem pouco a ver com o bioetanol de trigo ou de milho. Este livro tem como premissa tal distinção e argumenta que, tanto em termos energéticos

como de efeitos sobre a segurança alimentar, a produção de bioetanol de cana é superior às demais alternativas.

Composta de nove capítulos, a obra procura cobrir de forma abrangente essa ampla temática. O livro foi coordenado pelo BNDES e pelo CGEE, encarregados da produção dos capítulos de 1 a 7 e do capítulo 9. A Cepal e a FAO supervisionaram a produção do capítulo 8 e forneceram feedback significativo a todos os demais capítulos.

No primeiro capítulo, são apresentados os conceitos de bioenergia e são revisadas sua evolução e a importância na atualidade. O segundo capítulo apresenta o etanol como um combustível veicular e comenta suas propriedades e seu desempenho, além de abordar aspectos econômicos e os requisitos de logística para sua utilização. No terceiro capítulo, descrevem-se os diferentes processos de produção do bioetanol de vegetais que contêm açúcares ou amiláceos. São ainda detalhadas as rotas da cana-de-açúcar e do milho e apresentam-se os balanços de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) para cada caso. Os co-produtos do bioetanol no processamento da cana-de-açúcar, como o açúcar e a bioeletricidade, são analisados no quarto capítulo, enquanto as rotas inovadoras, associadas à hidrólise dos resíduos e à gaseificação, são tratadas no quinto capítulo. Até esse ponto, os temas são abordados de forma técnica, passível de ser aplicada em outros contextos, com referências eventuais à experiência brasileira. O programa brasileiro de bioetanol, implementado desde 1931 e reforçado a partir de 1975, é apresentado no sexto capítulo, que revisa sua evolução, seus indicadores e as perspectivas atuais. Por sua evidente importância, a sustentabilidade da produção de bioetanol de cana-de-açúcar, em seus aspectos ambientais, econômicos e sociais, com ênfase na experiência brasileira, é analisada à parte no capítulo seguinte, incluindo comentários sobre a certificação dos biocombustíveis. No oitavo capítulo, que contou com a supervisão da Cepal e da FAO, apresenta-se o potencial global para a produção de biocombustíveis e discutem-se as políticas adotadas para seu fomento, avaliando-se as perspectivas de formação de um mercado global para o bioetanol e suas implicações sobre a oferta de alimentos. Finalmente, no nono capítulo, procura-se apresentar uma síntese dos principais pontos estudados e oferecer algumas recomendações.

Por seu conteúdo, este livro pretende servir de base para um debate sobre o potencial e as limitações da produção de etanol de cana-de-açúcar, especialmente nas regiões onde atualmente sua cultura é praticada. Neste marco, reconhece-se a importância de políticas e incentivos que assegurem o desenvolvimento de um mercado competitivo para o etanol de cana-de-açúcar, mas sem comprometer a segurança alimentar nem os objetivos prioritários de redução da pobreza e fome e manejo sustentável dos recursos naturais.

Nessa direção, é importante constatar que muitos países, especialmente aqueles localizados em países tropicais e subtropicais, como boa parte da América Latina e do Caribe, dispõem das condições adequadas quanto a requerimentos de solo, água, radiação solar e disponibilidade de terras para expandir a produção de cana-de-açúcar com fins energéticos. Estudos recentes destacam a possibilidade de explorar essas vantagens comparativas em condições sustentáveis, por meio de estratégias que promovam um balanço dos custos e benefícios implicados, considerando suas dimensões econômicas, sociais, ambientais e estratégicas. Tais estratégias devem estar sujeitas a uma análise cuidadosa de seus impactos sobre alguns fatores, como mudança do uso da terra, padrões de investimento, emissões de gases de efeito estufa, fluxos de comércio e segurança alimentar, como destacado em fóruns internacionais recentes. O processo todo pode se beneficiar da experiência acumulada pelo Brasil, acervo de conhecimento que representa, sem dúvida, um importante ativo para outros países da região, a ser potencializado mediante políticas adequadas de cooperação horizontal.

Para potencializar as vantagens da produção de bioetanol de cana-de-açúcar, é importante que haja maior integração e coerência das políticas em níveis nacional e internacional e entre as ações dos setores público e privado, para evitar mecanismos limitadores das legítimas vantagens comparativas que muitos países detêm para a produção desse biocombustível. Assim, como discutido neste livro, é particularmente relevante: (a) desenvolver metodologias comuns para a análise do ciclo de vida das emissões de GEE, reconhecendo a importância das emissões diretas e indiretas associadas à mudança do uso da terra; (b) adotar padrões não-distorsivos, acordados internacionalmente, para avaliar as possíveis implicações ambientais da produção de bioenergia; (c) estabelecer orientações para a estimativa de emissões de GEE em países desenvolvidos e em desenvolvimento, o cumprimento de regras no âmbito da Organização Mundial do Comércio (OMC) e a prevenção de barreiras comerciais; e (d) alcançar maior vínculo entre as políticas alimentares e energéticas, de maneira que não seja comprometida a segurança alimentar nem sejam despojados os agricultores dos potenciais lucros que poderiam obter da produção de biocombustíveis.

A agenda do bioetanol se amplia a cada dia. Alguns temas ainda estão abertos a discussão, mas fogem ao escopo deste livro, devendo ser trabalhados em futuro próximo. Um destes temas é a globalização do bioetanol. Como no caso do petróleo, a criação de um mercado mundial de bioetanol implica a adoção de um conjunto de medidas, para ampliar a segurança no seu fornecimento e a construção de alianças e desenvolvimento de mercados consumidores, com regras claras nos mecanismos de formação de preços e na definição de especificações de referência.

Outros temas relevantes são a proteção intelectual do desenvolvimento biotecnológico e do melhoramento das variedades de cana e as providências para manter a atual vantagem competitiva dos produtores de bioetanol nos países em desenvolvimento.

Hoje em dia, está claro que as políticas relacionadas aos biocombustíveis devem ser orientadas por quatro princípios fundamentais:

a) orientação para o mercado, de forma a reduzir as distorções nos mercados agrícola e de biocombustíveis e evitar a introdução de novas restrições;

b) sustentabilidade ambiental, para buscar o desenvolvimento de biocombustíveis com efeitos positivos líquidos em termos energéticos e diminuição sensível nas emissões de gases de efeito estufa, sob reduzido impacto ambiental no contexto de sua produção;

c) promoção do desenvolvimento econômico, valorizando a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação para melhorar a eficiência física e econômica da produção de matérias-primas e sua conversão em biocombustíveis; e

d) proteção às populações de baixa renda e melhora na segurança alimentar, a fim de corrigir os problemas criados pelo déficit de alimentos e pela dependência de importações de petróleo dos países mais pobres e com maiores problemas de fome.

Considerando essas orientações fundamentais, as instituições envolvidas na preparação deste livro entendem que programas de produção e uso de etanol de cana-de-açúcar, adequadamente desenhados e bem conduzidos, podem contribuir para reforçar positivamente as relações entre os países e promover de modo efetivo o desenvolvimento sustentável em suas sociedades.

Luciano Coutinho
Presidente, BNDES

Lúcia Melo
Presidente, CGEE

Alicia Bárcena
Secretária executiva, Cepal

José Graziano da Silva
Representante regional da FAO para América Latina e Caribe

Luz do sol
que a folha traga e traduz
em verde novo,
em folha, em graça,
em vida, em força, em luz...
Luz do sol, *Caetano Veloso*

Capítulo 1

Bioenergia e biocombustíveis

A conversão da energia solar em energia química, que se realiza nos vegetais durante a fotossíntese, é um dos fenômenos mais fascinantes da natureza. Na planta iluminada pelo sol, a fugaz radiação solar se transforma em produtos estáveis, absolutamente essenciais para a vida em nosso planeta. E, desde o início da humanidade, foi a simbiose com o mundo vegetal que lhe garantiu o suprimento de alimentos, energia e matérias-primas de amplo uso, permitindo, ao longo de milênios, a evolução dos padrões de conforto e produtividade econômica. Depois de um breve interregno nos últimos séculos, durante os quais a energia solar fossilizada passou a ser sofregamente explorada e utilizada, na forma de carvão, petróleo e gás natural, a energia fotossintética volta, paulatinamente, à frente do cenário. Capaz de mitigar preocupantes problemas ambientais, a energia fotossintética traz uma nova dinâmica ao mundo agroindustrial e oferece uma alternativa à necessária evolução da sociedade industrial moderna para um contexto energético mais sustentável e racional. Sem pretender ser a solução exclusiva, a captação e o armazenamento de energia solar nos vegetais podem cumprir um papel destacado no futuro energético das nações. De fato, como já dizia Melvin Calvin – Prêmio Nobel de Química, em 1961, por suas descobertas sobre a fotossíntese –, as folhas são verdadeiras "fábricas silenciosas".

Este capítulo inicial é dedicado aos conceitos básicos e à evolução da bioenergia, em especial para os biocombustíveis, considerando-se uma visão de longo prazo. Posteriormente, serão abordadas em mais detalhes a expansão e as perspectivas atuais do mercado brasileiro de bioetanol e do mercado mundial de biocombustíveis.

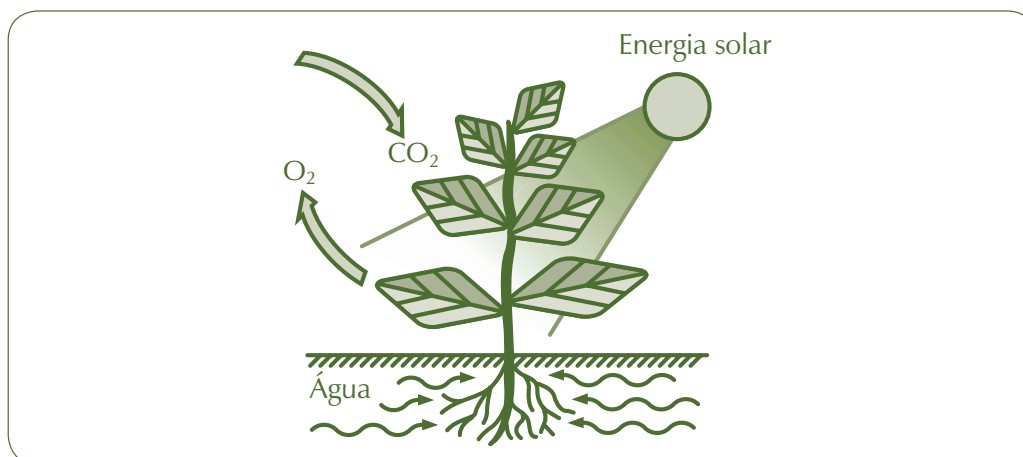
1.1 Fundamentos da bioenergia

Em sua acepção mais rigorosa, energia é a capacidade de promover mudanças, que se apresenta em muitas formas, como a energia térmica, a energia elétrica e a energia química, sempre representando um potencial para causar transformações, sejam naturais ou determinadas pelo homem. A energia química é a forma de energia fornecida mediante reações químicas, em que acontece uma mudança de composição, por meio da qual reagentes se convertem em produtos, geralmente com liberação de calor. Por exemplo, a energia química se encontra disponível nos alimentos e nos combustíveis, sendo usada nos processos vitais dos animais e do homem e para mover veículos, entre outros fins.

Um caso particular de energia química é a bioenergia, que pode ser definida como toda e qualquer forma de energia associada a formas de energia química acumulada mediante processos fotossintéticos recentes. Em geral, denomina-se biomassa os recursos naturais que dispõem de bioenergia e que podem ser processados para fornecer formas bioenergéticas mais elaboradas e adequadas para o uso final. Portanto, seriam exemplos de fontes de bioenergia a lenha e os resíduos de serrarias, o carvão vegetal, o biogás resultante da decomposição anaeróbia de lixo orgânico e outros resíduos agropecuários, bem como os biocombustíveis líquidos, como o bioetanol e o biodiesel, e a bioeletricidade, gerada pela queima de combustíveis como o bagaço e a lenha.

No amplo contexto da bioenergia, a produção de biocombustíveis líquidos tem sido considerada para atender particularmente às necessidades de transporte veicular. Para esses fins, além dos biocombustíveis, ainda não existem, na atualidade, outras alternativas renováveis com maturidade tecnológica e viabilidade econômica suficientes. Os biocombustíveis líquidos podem ser utilizados de forma bastante eficiente em motores de combustão interna que equipam os mais diversos veículos automotores e que se classificam basicamente em dois tipos, dependendo da maneira pela qual se inicia a combustão: motores do ciclo Otto, com ignição por centelha, para os quais o biocombustível mais recomendado é o bioetanol; e motores do ciclo Diesel, no qual a ignição é conseguida por compressão e que podem utilizar com bom desempenho o biodiesel. Em ambas as situações, os biocombustíveis podem ser usados puros ou misturados com combustíveis convencionais derivados de petróleo. É interessante observar que, nos primeiros anos da indústria automobilística, durante a segunda metade do século XIX, os biocombustíveis representavam a fonte de energia preferencial para os motores de combustão interna, com a adoção do bioetanol, por Henry Ford, e do óleo de amendoim, por Rudolf Diesel. Esses dois produtos foram substituídos, respectivamente, pela gasolina e pelo óleo diesel à medida que os combustíveis derivados de petróleo passaram a ser abundantes e baratos, a partir do início do século passado. Os aspectos técnicos associados ao uso de etanol em motores serão comentados no próximo capítulo.

Automóvel Ford Modelo A (1896) para etanol puro.

***Figura 1* – O processo de fotossíntese**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

A produção de biomassa, como resultado da reação de fotossíntese, depende essencialmente da energia solar e da presença de água e dióxido de carbono (CO_2), desenvolvendo-se nas células vegetais dos estômatos das folhas segundo complexos ciclos que podem ser representados pela expressão a seguir, em que água e gás carbônico se combinam para a formação de uma molécula de glicose, que é um açúcar simples, e oxigênio.

$$6\,H_2O + 6\,CO_2 \xrightarrow{\text{luz solar}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \qquad (1)$$

Nessa reação, em termos energéticos, a formação de 1 kg de açúcar corresponde à fixação de cerca de 17,6 MJ (megajoules) de energia solar, equivalente a cerca de meio litro de gasolina. Pelo balanço de massa dessa reação, tem-se que a síntese de 1 kg de glicose consome cerca de 0,6 kg de água e 1,4 kg de dióxido de carbono, liberando para a atmosfera 1 kg de oxigênio. Naturalmente, essa água representa apenas a parcela utilizada na composição do açúcar, pois durante seu crescimento e, especialmente, durante a fotossíntese, quando ocorre a evapotranspiração, o vegetal necessita de água em volumes centenas de vezes acima da quantidade fixada no produto vegetal. Assim, a condição fundamental para a produção de biomassa e, conseqüentemente, de bioenergia é a disponibilidade de radiação solar, de água e de dióxido de carbono.

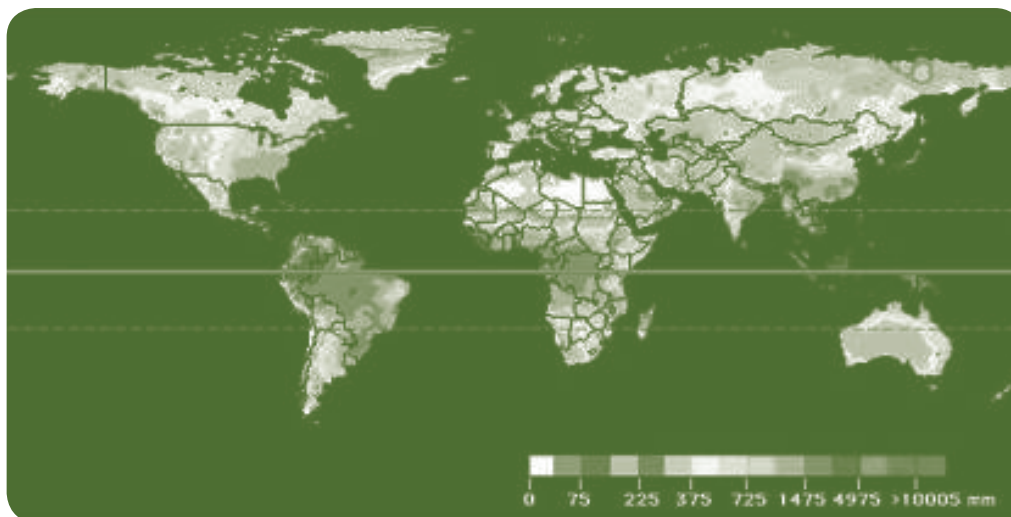
Entre esses fatores de produção básicos para a produção vegetal, o dióxido de carbono é o menos problemático, pois encontra-se bem distribuído na atmosfera, em concentrações suficientes para as plantas. No entanto, é relevante observar que sua concentração tem mostrado, nas últimas décadas, um preocupante crescimento, principalmente associado ao uso intensivo de combustíveis fósseis, capaz de promover o incremento do efeito estufa na atmosfera terrestre e o conseqüente aquecimento global. Nesse sentido, os biocombustíveis apresentam duas importantes vantagens: seu uso permite reduzir a emissão de carbono para a atmosfera e, além disso, a produção de biomassa é potencialmente favorecida, dentro de limites e para algumas espécies, pela crescente disponibilidade de dióxido de carbono na atmosfera.

Com relação à radiação solar, interessa conhecer qual a fração utilizada pelas plantas e como está disponível no planeta. A fotossíntese se realiza com absorção de luz pela clorofila em faixas específicas do espectro solar, especialmente para os comprimentos de onda entre 400 e 700 nm (nanômetro), região da cor vermelha. Em fisiologia vegetal, essa faixa é chamada de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês *photosynthetically active radiation*) e corresponde, aproximadamente, a 50% do total da radiação solar. Com relação à disponibilidade da radiação solar, o fator primordial é a latitude, que faz com que as regiões tropicais recebam mais energia solar comparativamente às situadas em latitudes mais altas. De acordo com o Atlas Solarimétrico Brasileiro, uma área de um metro quadrado, situada entre 10° e 15° de latitude sul, na Região Norte do Brasil, recebe, em média, 18,0 MJ/dia, enquanto, para uma latitude entre 20° e 25°, na Região Sul, essa mesma área recebe 16,6 MJ/dia, cerca de 8% menos energia [Cresesb/UFPE/Chesf (2000)]. Também associada à latitude, a temperatura ambiente é outro fator que influi diretamente na fotossíntese. Dentro de limites, maiores

temperaturas favorecem a produção bioenergética, reforçando a vantagem das regiões mais quentes do planeta nesse sentido.

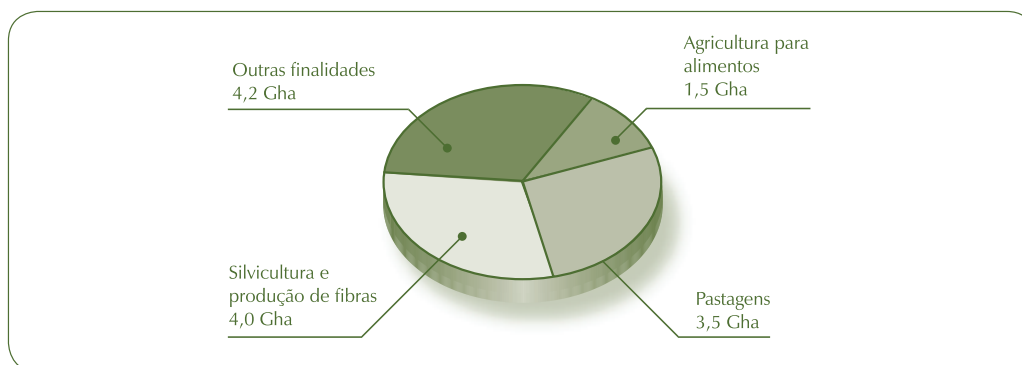
A água, o último dos fatores essenciais para a fotossíntese, constitui, de fato, o grande limitante a considerar para a produção vegetal. A reduzida disponibilidade de recursos hídricos com adequada qualidade e sua heterogênea distribuição sobre os continentes configuram um dos grandes desafios para o desenvolvimento de muitas nações. Extensas áreas ensolaradas nas regiões semi-áridas pouco podem contribuir como fonte de biomassa sem que sejam irrigadas com volumes significativos de água, implicando custos sempre muito altos e, freqüentemente, dispêndios energéticos que inviabilizam a produção bioenergética. Em escala mundial, a irrigação, atualmente, já consome mais de 70% dos recursos hídricos disponíveis e responde por cerca de 40% da produção agrícola, tornando o acesso à água um tema de enorme prioridade [Horta Nogueira (2008)]. Além disso, os possíveis câmbios climáticos decorrentes do aumento do efeito estufa em nosso planeta tendem a alterar de forma preocupante os regimes pluviais e hídricos, ampliando os riscos de fenômenos críticos, como secas e enchentes, que, evidentemente, afetam a produção vegetal de modo negativo.

Conforme representado na Figura 2, algumas regiões tropicais, especialmente na América do Sul e na África, apresentam significativa disponibilidade pluvial. Somada à maior incidência de energia solar e às temperaturas adequadas, essa é uma vantagem relevante, que configura, em tais regiões, os contextos mais favoráveis para a produção de bioenergia, a ser promovida, naturalmente, em harmonia com as exuberantes florestas e a agricultura aí existentes.

***Figura 2* – Pluviosidade média anual**

Fonte: FAO (1997).

Além dos fatores básicos (luz, água e dióxido de carbono), outros requisitos importantes para a produção bioenergética são a fertilidade do solo e a topografia. Os principais nutrientes minerais para o crescimento vegetal são nitrogênio, fósforo e potássio, mas também é decisiva a disponibilidade, em menores teores, de outros minerais, como boro, manganês e enxofre, assim como a presença de matéria orgânica. Além disso, um solo fértil caracteriza-se por sua adequada estrutura e porosidade. De modo geral, os cultivos bioenergéticos exigem o emprego regular de fertilizantes químicos para alcançar níveis satisfatórios de produtividade, cuja manutenção depende ainda de um manejo correto dos solos, especialmente da mecanização nas operações agrícolas. Com relação à topografia, a inclinação das áreas de cultivo não deve ser muito grande, visando menor incidência de processos erosivos, principalmente nos cultivos de ciclo anual, bem como para facilitar as operações de cultivo e colheita.

A consideração conjunta de todos esses fatores delimita a área potencialmente cultivável, para bioenergia e todos os demais usos. Considerando todo o planeta, essa área tem sido estimada em 13,2 bilhões de hectares, dos quais são atualmente utilizados para a produção de alimentos para seres humanos e para animais cerca de 1,5 bilhão de hectares, correspondentes a 11% do total [Hoogwijk et al. (2003)]. Adiantando um tema que será analisado em mais detalhes no Capítulo 8, o Gráfico 1 mostra como se distribuem os usos da superfície cultivável entre todos os continentes, sinalizando a existência de áreas disponíveis para a expansão das fronteiras agrícolas e a produção de bioenergia, em especial nos locais ainda pouco explorados ou utilizados de forma extensiva, como em pastagens de baixa produtividade.

Gráfico 1 **– Usos da superfície cultivável na Terra**

Fonte: Elaborado com base em Hoogwijk et al. (2003).

Como um dos parâmetros elementares em sistemas bioenergéticos, é relevante conhecer a eficiência dos cultivos nos processos de captação e armazenamento de energia solar. Ao determinar como e quanto da energia solar é realmente convertida em bioenergia e ao compreender como ocorrem as transformações e perdas de energia, torna-se possível obter as condições mais favoráveis para o desempenho das plantas como coletoras de energia. Entre-

tanto, apenas nas últimas décadas têm sido elucidados os mecanismos bioquímicos que permitem ao vegetal sintetizar açúcares e outros produtos químicos, sendo estabelecidas as rotas de fixação do carbono e identificadas suas diferentes fases, que se desenvolvem segundo uma seqüência complexa de reações sucessivas, com diversas bifurcações e compostos instáveis, até a formação de substâncias estáveis, denominadas *ciclos fotossintéticos*. Tal conhecimento descortina uma nova e importante fronteira de possibilidades para compreender o comportamento das plantas e incrementar a produtividade das espécies com potencial bioenergético.

Os ciclos fotossintéticos de maior interesse são o ciclo de Calvin, ou ciclo C3, e o ciclo Hatch-Lack, ou ciclo C4, em que a molécula do primeiro produto estável produzido apresenta, respectivamente, três carbonos (ácido fosfoglicérico) ou quatro carbonos (produtos como oxaloacetato, malato e aspartato) [Hall e Rao (1999)]. Enquanto a maioria das plantas conhecidas utiliza o ciclo C3, em algumas gramíneas tropicais, como cana-de-açúcar, cevada e sorgo, foi identificado o ciclo C4. Tal distinção é relevante para o desenvolvimento de sistemas bioenergéticos, em função da grande diferença de produtividade entre tais ciclos em favor do ciclo C4, que apresenta elevada taxa fotossintética de saturação (absorve mais energia solar), ausência de perdas por fotorrespiração, alta eficiência na utilização da água, maior tolerância salina e baixo ponto de compensação para o CO_2, ou seja, responde melhor sob menores concentrações desse gás. Em síntese, pode-se afirmar que os vegetais com ciclo C4 são os mais aptos à produção bioenergética. A Tabela 1 apresenta uma comparação de alguns parâmetros de interesse para esses dois ciclos fotossintéticos.

Tabela 1 **– Parâmetros de desempenho vegetal para os ciclos fotossintéticos**

Característica	Espécies C3	Espécies C4
Razão de transpiração (kg de água evaporada por kg sintetizado)	350 – 1000	150 – 300
Temperatura ótima para fotossíntese (grau C)	15 a 25	25 a 35
Local da fotossíntese	Toda a folha	Parte externa da folha
Resposta à luz	Saturada para radiações médias	Não-saturada sob radiações elevadas
Produtividade anual média (t/ha)	~ 40	60 a 80
Aptidão climática	Temperado a tropical	Tropical
Exemplos	Arroz, trigo, soja, todas as frutíferas, oleaginosas e a maioria dos vegetais conhecidos	Milho, cana-de-açúcar, sorgo e outras gramíneas tropicais

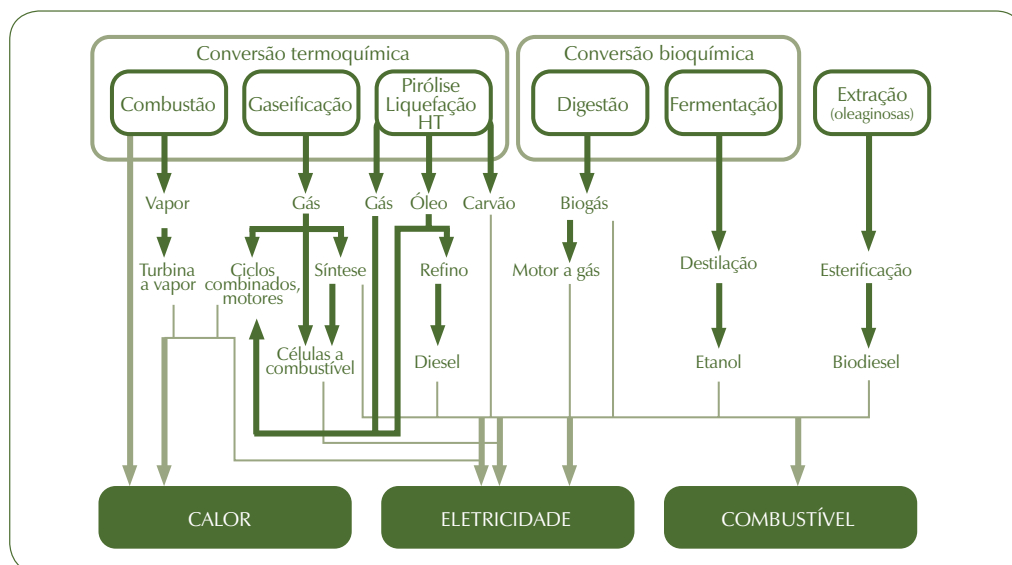
Fonte: Janssens et al. (2007).

Da radiação solar incidente sobre a Terra, de 178 mil TW (terawatt ou bilhão de quilowatts), estima-se que cerca de 180 TW, ou 0,1%, são utilizados nos processos fotossintéticos, naturais ou promovidos pelo homem. Desse modo, em todo o planeta, são produzidos, anualmente, cerca de 114 bilhões de toneladas de biomassa, em base seca, correspondendo a, aproximadamente, 1,97 bilhão de TJ (terajoule ou bilhão de quilojoules), equivalentes a 314 trilhões de barris de petróleo, cerca de dez mil vezes o atual consumo mundial desse combustível fóssil. Nesse contexto, a eficiência média de assimilação da energia solar é inferior a 1%, embora vegetais de maior desempenho, como a cana-de-açúcar, possam atingir 2,5% em média anual [Smil (1991)]. Naturalmente, esses valores servem apenas como referência para a compreensão da magnitude energética da fotossíntese, não havendo sentido em imaginar a bioenergia como substituta de todas as formas fósseis de suprimento energético, principalmente nos países de elevada demanda. Esse crescimento vegetal ocorre, como visto, sobretudo em formações nativas das regiões tropicais, estimando-se que as atividades agrícolas correspondem a cerca de 6% desse total.

É interessante observar que, dependendo do vegetal, a energia solar é fixada em diferentes substâncias e órgãos de acumulação, que determinam as rotas tecnológicas passíveis de serem adotadas para sua conversão em biocombustíveis para uso final. Na cana-de-açúcar, por exemplo, as reservas energéticas se localizam principalmente nos colmos, como sacarose, celulose e lignina, sendo tradicionalmente empregadas na produção de bioetanol e bagaço, mas também as pontas e folhas da cana apresentam crescente interesse, à medida que se desenvolvem processos para a utilização de seu substrato lignocelulósico. Por sua vez, nas árvores e outras espécies lenhosas, o conteúdo energético está essencialmente no fuste (tronco mais galhos), na forma de celulose e lignina, sendo empregado basicamente como lenha. As raízes e tubérculos de plantas como a mandioca e a beterraba acumulam amido e sacarose, enquanto os frutos e as sementes, como o dendê e o milho, acumulam geralmente amido, açúcar e óleos vegetais, de acordo com cada espécie.

Além de definirem as rotas tecnológicas mais adequadas para conversão da biomassa em biocombustíveis, esses aspectos são relevantes para a eficiência global de captação e utilização de energia solar: para a síntese de carboidratos (como celulose e sacarose), o vegetal requer cerca de 60% menos energia do que para a síntese de gorduras ou lipídios [Demeyer et al. (1985)], por unidade de massa de produto final, o que, em princípio, torna as rotas associadas ao biodiesel comparativamente menos eficientes do que as rotas do bioetanol, com base na sacarose ou na celulose.

A Figura 3 apresenta uma síntese das diversas rotas de conversão que podem ser aplicadas para transformar a biomassa em biocombustíveis e calor útil. Além dos processos físicos, puramente mecânicos, para concentração, redução granulométrica, compactação ou redução da umidade da biomassa, são utilizados dois grupos de tecnologias químicas, que alteram a composição da matéria-prima para fornecer produtos mais compatíveis com os usos finais: processos termoquímicos, que empregam matérias-primas com baixa umidade e temperaturas elevadas; e processos bioquímicos, desenvolvidos em meios com elevado teor de água e temperaturas próximas à condição ambiente.

Figura 3 – **Rotas tecnológicas para produção de bioenergia**

Fonte: Elaborado com base em Turkenburg et al. (2000), apud Seabra (2008).

1.2 Evolução da bioenergia e dos biocombustíveis

A bioenergia, em suas diferentes formas, foi a principal e, em algumas situações, a única forma de suprimento energético exógeno utilizada pelo homem ao longo de sua história. Desde as primitivas fogueiras há mais de 500 mil anos, a biomassa lenhosa foi a fonte energética por excelência e cobria as necessidades domésticas de energia para cocção e aquecimento, além de suprir os primitivos sistemas de iluminação, que empregavam gorduras vegetais e animais em candeeiros e velas. Posteriormente e durante milênios, a produção cerâmica e metalúrgica passou a representar uma demanda importante de bioenergia, consumida em fornos e forjas. Apenas a partir do século XVIII, ocorreu a exaustão das reservas de lenha disponíveis em boa parte da Europa Ocidental e, principalmente, na Inglaterra, um fator determinante para o início da exploração do carvão mineral e que, junto com a máquina a vapor, tornou-se um dos fatos desencadeadores da Revolução Industrial. Não houvesse sido introduzida a energia fóssil, na forma de carvão mineral, disponível em quantidade abundante e com acesso relativamente fácil na época, a história moderna certamente teria tido outro percurso.

Do Brasil colonial, temos o registro interessante de um processo agroindustrial relevante economicamente, suprido pela energia da biomassa. Conforme relata Antonil (1982), os engenhos de açúcar do Recôncavo Baiano, durante o século XVII, possuíam

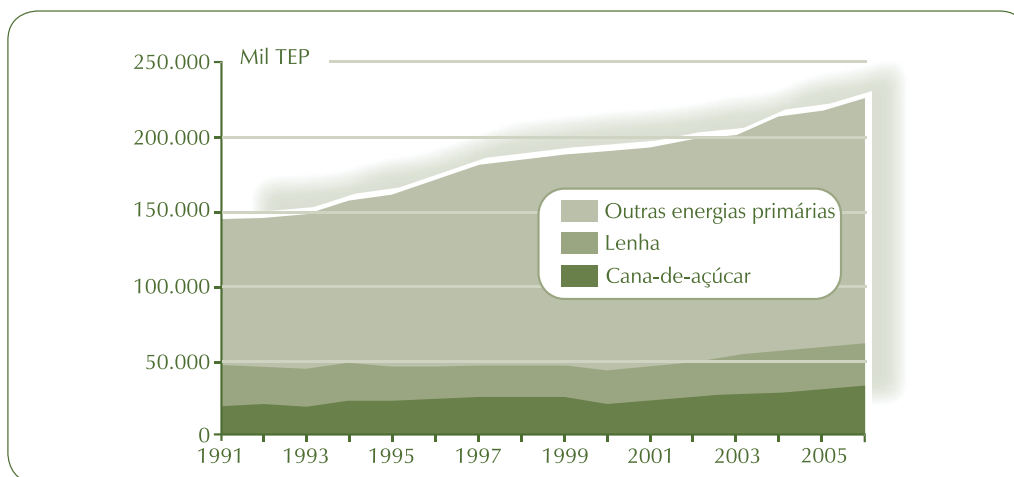
> as fornalhas, que por sete meses ardem dia e noite, querem muita lenha... (pois) o alimento do fogo é a lenha, e só o Brasil, com a imensidade dos matos que tem, podia fartar, como fartou por tantos anos, e fartará nos tempos vindouros, a tantas fornalhas, quantas são as que se contam nos engenhos da Bahia, Pernambuco e Rio de Janeiro...

É curioso imaginar o que tais engenhos faziam, então, com o bagaço das canas processadas – se o empregavam para alimentação dos bois de carro ou o destinavam a outros fins –, pois esse subproduto poderia constituir a fonte de energia básica para o processo produtivo, como acontece nas usinas de açúcar e bioetanol de hoje em dia, que não usam lenha e ainda produzem excedentes consideráveis de energia exportável na forma de bagaço e eletricidade.

Como em outros países em desenvolvimento situados em regiões tropicais, a amplitude dos recursos bioenergéticos no Brasil ajuda a entender por que, apenas depois de 1915, os combustíveis fósseis passaram a ser utilizados com alguma relevância no país, onde a lenha permaneceu mais importante do que o petróleo no suprimento energético até 1964 [Dias Leite (2007)]. Com efeito, em muitas estradas de ferro brasileiras, que eram quase a única forma de transporte de carga a médias distâncias, assim como nas embarcações da Amazônia e nas gaiolas do rio São Francisco e mesmo para a geração de energia elétrica em sistemas isolados utilizando locomóveis (conjuntos de máquinas a vapor simples e caldeiras de pequeno porte), a lenha era o único combustível empregado até meados do século XX. O Gráfico 2 mostra como evoluiu a oferta interna de energia no Brasil nas últimas décadas e qual a contribuição da bioenergia, separando-se as parcelas devidas à cana e à lenha. Em 2007, essas fontes de bioenergia corresponderam, respectivamente, a 16,0% e 12,5% do consumo total de energia no país [MME (2008)].

Os dados referentes à bioenergia e, particularmente, à parcela da lenha nas estatísticas energéticas são, para a maioria dos setores, determinados de forma indireta, com base em indicadores como a produção da indústria de papel e celulose e o número de fogões a lenha. Recentemente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) passou a rever essa metodologia, visando melhorar a consistência dessas informações no caso brasileiro. De todo modo, levantamentos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) têm demonstrado que a lenha permanece como um combustível importante em nível doméstico. Nas mais de 50 milhões de residências brasileiras, cerca de 3,5% cozinham apenas com biomassa e mais de 14% fazem uso simultâneo de lenha e gás liquefeito de petróleo [IBGE (2005)]. Na agroindústria (laticínios, carnes, doces), em geral, e na indústria cerâmica, especialmente de pequeno e médio portes, a lenha é o principal energético, cada vez mais produzida com base na silvicultura, em uma cadeia energética que amplia a geração de valor no meio rural.

Gráfico 2 – **Participação da bioenergia na oferta interna de energia no Brasil**

Mil TEP
250.000
200.000
150.000
100.000
50.000
0
1991 1993 1995 1997 1999 2001 2003 2005
Outras energias primárias
Lenha
Cana-de-açúcar

Fonte: MME (2008).

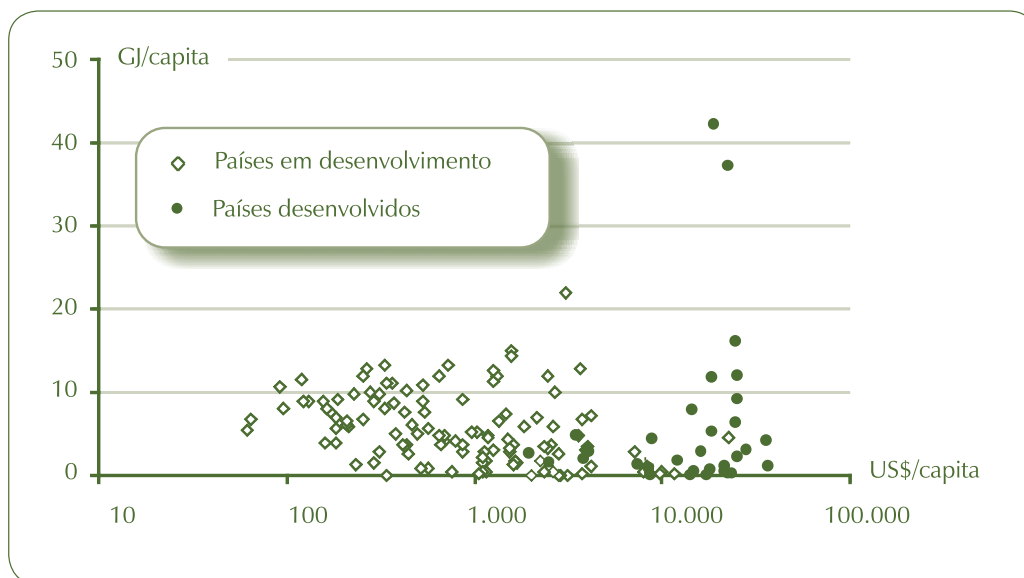
Estima-se que as florestas plantadas para fins econômicos no Brasil cubram 4,1 milhões de hectares, dos quais cerca da metade é destinada a fins energéticos, principalmente para a produção de carvão vegetal [FAO (2006)]. Essa superfície reflorestada vem se expandindo, anualmente, em cerca de 250 mil hectares e apresenta produtividades energéticas interessantes, associadas a um significativo desenvolvimento das tecnologias em silvicultura. Embora uma parcela relevante da produção de carvão vegetal, efetuada principalmente na Amazônia oriental, e uma parte da demanda industrial no semi-árido nordestino ainda permaneçam baseadas no desmatamento e na exploração predatória de formações nativas, de uma maneira geral, o uso de lenha no Brasil apresenta bons indicadores de sustentabilidade em suas várias vertentes [FAO (2007a)].

Em termos globais e atualizando os dados da Agência Internacional de Energia (AIE), a demanda de energia comercial (isto é, que passou pelos mercados energéticos), em 2007, foi de 470 milhões de GJ, correspondendo a cerca de 82 bilhões de barris de petróleo em um ano [Best et al. (2008)]. Desse consumo total, aproximadamente 88% foram obtidos de recursos fósseis, especialmente carvão mineral e petróleo. O restante foi conseguido mediante bioenergia, energia hidrelétrica, energia nuclear e, em menor grau, outras fontes, como energia geotérmica e energia eólica (com destaque para a bioenergia, a mais importante entre as energias renováveis). A bioenergia, cujo aporte anual (comercial e não-comercial) é estimado em 45 milhões de GJ [Best et al. (2008)], pode ser encontrada em uso nos fogões a lenha de grande parte das moradias de todo o mundo, nos fornos e fornalhas de caldeiras de muitas agroindústrias e nos tanques de combustível de um número crescente de veículos, sobretudo nos países industrializados.

Desse modo, os sistemas bioenergéticos apresentam uma marcada dicotomia entre dois grandes e diferenciados paradigmas. No primeiro caso, encontram-se os sistemas tradicionais, praticados há milhares de anos, nos quais a exploração dos recursos de biomassa se faz em bases extrativistas, sem adequada valoração econômica dos produtos e, em geral, por meio de sistemas de baixa eficiência e menor produtividade, atendendo a necessidades residenciais e de indústrias tradicionais. Como exemplos desse quadro, têm-se a utilização de lenha para a cocção doméstica no meio rural, prática comum e sem impactos notáveis, e a danosa produção de carvão vegetal associada ao desmatamento, fadada a desaparecer. Como segundo paradigma, encontram-se os sistemas inovadores e modernos de bioenergia, em que a produção ocorre quase sempre em bases comerciais, por meio de tecnologias eficientes, mesmo do ponto de vista ambiental, visando atender às necessidades de energia da moderna indústria, do setor de transporte e na geração de eletricidade. Para esse caso, podem ser citadas como exemplos as cadeias bioenergéticas do bioetanol de cana-de-açúcar, do biodiesel de palma ou de sebo, da bioeletricidade produzida com bagaço, licor negro ou lixívia celulósica, entre outras.

Essa dupla realidade fica evidenciada no Gráfico 3, em que se relaciona o consumo bioenergético (essencialmente com base em recursos lenhosos) *per capita* com a renda *per capita* para diversos países. Se tomados apenas os pontos claros, correspondentes aos países em desenvolvimento, onde predominam as formas tradicionais de bioenergia, pode-se afirmar que o crescimento da renda conduz a uma redução da demanda bioenergética ou, dito de outra forma, que o uso da bioenergia é uma característica das nações pobres. Contudo, tal hipótese não se confirma quando se incluem na análise os países industrializados, correspondentes aos pontos escuros, onde, mesmo para rendas elevadas, a demanda de bioenergia pode ser relevante, alcançando níveis superiores aos demais países.

Como exemplos notáveis de países de elevado consumo energético e situados em regiões frias, de baixa insolação e, portanto, de baixa produtividade fotossintética, mas que conseguem produzir sustentavelmente volumes importantes de bioenergia, a Suécia e a Finlândia obtêm da fotossíntese, respectivamente, 19% e 20% de sua demanda energética total [Hall et al. (2005)]. Como outro exemplo notável, estudos dos Departamentos de Energia e Agricultura dos Estados Unidos indicam para 2030 uma produção anual de biomassa para fins energéticos e industriais de um bilhão de toneladas (base seca), capaz de reduzir em 30% a demanda prevista de petróleo [DOE/USDA (2005)]. Nesses casos, como na moderna produção de biocombustíveis, a bioenergia é concebida sob modernas tecnologias de produção e conversão, atendendo aos pressupostos de sustentabilidade e sendo reconhecida como uma forma renovável de suprimento energético [FAO (2001)].

Gráfico 3* – Contribuição da bioenergia em função da renda *per capita

Fonte: FAO (1998).

Sob tais acepções, cada vez mais a evolução da bioenergia, em escala mundial, aponta para a redução da contribuição das bioenergias tradicionais, a serem mantidas circunscritas às situações de menor impacto, enquanto as bioenergias modernas se expandem, ocupando o espaço das fontes energéticas fósseis. Dessa forma, a bioenergia, progressivamente, deixa de ser considerada uma energia "antiga" e passa a ser reconhecida como uma forma energética moderna, competitiva e adequada, em condições de proporcionar uma nova revolução tecnológica. Como profetiza Sachs (2007):

> A bioenergia é apenas uma parte de um conceito mais amplo do que se chama desenvolvimento sustentado, um conceito que se baseia no tripé biodiversidade, biomassa e biotecnologia e que pode servir de alavanca para o lugar que a biomassa poderá representar nas próximas décadas.

Capítulo 2

Etanol como combustível veicular

Qualquer que seja sua origem – biomassa ou processos petroquímicos e carboquímicos –, o etanol é um combustível, ou seja, libera significativas quantidades de calor ao se queimar. Contudo, o etanol apresenta algumas diferenças importantes em relação aos combustíveis convencionais derivados de petróleo. A principal delas é o elevado teor de oxigênio, que constitui cerca de 35% em massa do etanol. As características do etanol possibilitam a combustão mais limpa e o melhor desempenho dos motores, o que contribui para reduzir as emissões poluidoras, mesmo quando misturado à gasolina. Nesses casos, comporta-se como um verdadeiro aditivo para o combustível normal, melhorando suas propriedades. Mas, apesar da longa experiência com o etanol como combustível em alguns países, em particular o Brasil, é notável como, em diversos países onde o etanol ainda não é utilizado regularmente, subsistem preconceitos e desinformações sobre as reais condições de uso e as vantagens que devem ser associadas a esse combustível e aditivo.

O presente capítulo busca apresentar aspectos técnicos, econômicos e ambientais importantes sobre etanol como combustível em motores de combustão interna, seja em misturas com gasolina (etanol anidro, isto é, sem água) ou puro (etanol hidratado). Comentam-se, aqui, as principais características físicas e químicas que definem sua especificação e são revisadas sua adequação e sua compatibilidade com os elastômeros e metais de maior uso em motores, destacando a visão da indústria automobilística quanto ao seu uso. Também são analisadas as emissões atmosféricas associadas ao uso do etanol, comparativamente à gasolina. Igualmente de interesse para os contextos nacionais que pretendem adotar o etanol como combustível, comentam-se o marco legal genérico para o emprego de etanol para fins veiculares, algumas particularidades econômicas como a formação de preços no mercado de combustíveis com etanol e os mecanismos tributários associados e aspectos da logística do mercado de combustível, considerando a adoção de etanol.

2.1 Dimensões técnicas e ambientais do uso do etanol

O etanol, ou álcool etílico, é uma substância com fórmula molecular C_2H_6O, que pode ser utilizada como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha (ciclo Otto) de duas maneiras, basicamente: 1) em misturas de gasolina e etanol anidro; ou 2) como etanol puro, geralmente hidratado. A Tabela 2 sintetiza as principais características do etanol e de uma gasolina típica. Vale observar que essas propriedades não se referem a uma especificação formal, que inclui diversas outras propriedades e parâmetros associados à segurança, ao desempenho, à contaminação e à agressividade química. No caso brasileiro, as especificações, que devem ser atendidas pelos produtores e respeitadas por toda a cadeia de comercialização, são definidas pela Portaria ANP 309/2001, para a gasolina com etanol anidro, e pela Resolução ANP 36/2005, para o etanol anidro e hidratado, denominados, respectivamente, álcool etílico anidro combustível (AEAC) e álcool etílico hidratado combustível (AEHC), na legislação brasileira. Segundo essa legislação, considerando teores em massa, o etanol anidro deve conter menos 0,6% de água, enquanto que, para o etanol hidratado, esse teor deve estar entre 6,2% e 7,4%. Expressos como proporção em volume a 20° C, esses valores correspondem, respectivamente, a um teor máximo de 0,48% para o etanol anidro e a uma faixa de 4,02% a 4,87% para o etanol hidratado.

Tabela 2 **– Propriedades da gasolina e do bioetanol**

Parâmetro	Unidade	Gasolina	Etanol
Poder calorífico inferior	kJ/kg	43.500	28.225
	kJ/litro	32.180	22.350
Densidade	kg/litro	0,72 – 0,78	0,792
Octanagem RON *(Research Octane Number)*	–	90 – 100	102 – 130
Octanagem MON *(Motor Octane Number)*	–	80 – 92	89 – 96
Calor latente de vaporização	kJ/kg	330 – 400	842 – 930
Relação ar/combustível estequiométrica		14,5	9,0
Pressão de vapor	kPa	40 – 65	15 – 17
Temperatura de ignição	grau C	220	420
Solubilidade em água	% em volume	~ 0	100

Fonte: API (1998) e Goldemberg e Macedo (1994).

No Brasil, há várias décadas, os únicos combustíveis encontrados em todos os postos de gasolina para motores de ignição por centelha são:

- gasolinas regular e *premium*, com octanagem média (entre os métodos RON e MON) mínima de 87 e 91, respectivamente, ambas sempre com um teor de etanol anidro estabelecido entre 20% e 25%, conforme decisão do governo federal, empregadas nos veículos nacionais e importados com motores a gasolina, inclusive os modelos de luxo.

- etanol hidratado, com uma octanagem média superior a 110, usado em veículos aptos para seu uso, que podem usar motores próprios para esse combustível ou motores *flex-fuel*, capazes de usar quaisquer misturas de etanol hidratado e gasolina (com 20% a 25% de etanol).

O etanol hidratado puro deve ser usado em motores fabricados ou adaptados especificamente para esse fim, em particular com a adoção de taxas de compressão mais elevadas, visando utilizar adequadamente a octanagem mais alta do etanol frente à gasolina e obter ganhos de eficiência de 10%. Em outras palavras, a maior octanagem do etanol permite que os motores obtenham mais energia útil do calor do combustível, comparativamente à gasolina. Outras modificações devem ser efetuadas no sistema de alimentação de combustível e na ignição, para compensar as diferenças na relação ar-combustível e outras propriedades. Além disso, são requeridas modificações em alguns materiais em contato com o combustível, como tratamento anticorrosivo das superfícies metálicas dos tanques, filtros e bombas de combustível e substituição de tubulações ou adoção de materiais mais compatíveis com o etanol. Atualmente, após décadas de aperfeiçoamento de motores especialmente fabricados para etanol, a tecnologia automotiva está suficientemente desenvolvida para permitir que veículos a etanol puro hidratado tenham desempenho, dirigibilidade, condições de partida a frio e durabilidade absolutamente similares aos motores a gasolina, especialmente em países com invernos moderados.

Com a intensa utilização da eletrônica embarcada em sistemas avançados de controle de mistura e de ignição, a partir de 2003 foram lançados comercialmente, no Brasil, veículos com os motores flexíveis (*flex-fuel*), capazes de utilizar, sem qualquer interferência do motorista, gasolina (com 20% a 25% de etanol), etanol hidratado puro ou ainda misturas desses dois combustíveis em qualquer proporção, de acordo com os requisitos de eficiência e dirigibilidade e atendendo aos limites legais de emissões de gases de escapamento [Joseph Jr. (2007)]. Os veículos equipados com esses motores têm representado a maioria dos veículos novos vendidos no Brasil a partir de 2005 e, desde então, vêm se aperfeiçoando, em termos de desempenho e funcionalidade dos sistemas de partida a frio. Atualmente, existem mais de 60 modelos diferentes, fabricados por dez montadoras de origem americana, européia e japonesa, instaladas no país. Essa concepção de veículo flexível adotada no Brasil permite ao usuário escolher, de acordo com sua conveniência, o combustível que vai usar, desde 100% de etanol hidratado até uma gasolina com 20% a 25% de etanol. Nos Estados Unidos, no

Canadá e na Suécia, também são comercializados veículos com motores flexíveis, mas sob outro conceito, operando em uma faixa de teores de etanol que vai da gasolina pura, sem etanol, até uma mescla com 85% de etanol anidro e 15% de gasolina, produto disponível em uma quantidade crescente, mas ainda limitada, de postos, sob a sigla E85.

Entretanto, a maneira mais simples, freqüente e imediata para utilizar o etanol como combustível é mediante o uso de misturas com gasolina nos veículos já existentes no país, sem necessidade de efetuar modificações nos motores. Essa é a situação de maior interesse, tanto para os países em desenvolvimento que podem produzir etanol e dependem de importações de combustíveis para seu abastecimento, a custo cada vez mais elevado, quanto para os países industrializados que têm, atualmente, um potencial limitado de produção interna de etanol, mas que podem diversificar sua matriz de combustíveis líquidos, agregando à produção local o etanol importado de regiões com condições favoráveis para a produção desse biocombustível. Nesse sentido, cabe verificar as implicações da adoção de misturas de etanol e gasolina sobre o desempenho dos motores, a dirigibilidade e a durabilidade dos veículos e o impacto ambiental associado.

No Brasil, desde a década de 1980, o teor de etanol anidro em toda a gasolina comercializada nos postos revendedores esteve acima de 20%. Nos Estados Unidos, país que também passou a utilizar misturas etanol-gasolina naquela década, esse teor ficou limitado a 10%, também conhecido como E10, e passou a ser considerado pela indústria automobilística padrão máximo para adoção da mistura sem necessidade de alterações de materiais, componentes ou recalibrações de motor. Em anos recentes, diversos países, como China, Tailândia, Austrália e Colômbia, adotaram o E10 como ponto de partida para a introdução do uso do etanol em seus mercados. Em teores dessa ordem, o etanol atua como aditivo melhorador da qualidade da gasolina (*octane booster*) e redutor de emissões poluentes, substituindo o chumbo tetraetila e outros aditivos oxigenantes que apresentam restrição ambiental, como o MTBE, e vêm tendo seu uso banido em muitos países. A experiência de diversos países com o E10 permite afirmar que essa mistura pode ser introduzida para abastecer o parque veicular existente sem maiores alterações.

A Tabela 3 mostra como variam as exigências de alterações nos veículos em função do teor de etanol na gasolina [Joseph Jr. (2005)]. Observe-se que os veículos a gasolina utilizados no Brasil (fabricados localmente ou importados) estão preparados para utilizar teores médios de etanol e já contam com algumas modificações em relação a um veículo para gasolina pura. No caso dos motores flexíveis, verifica-se que a concepção norte-americana, que utiliza misturas com até 85% de etanol na gasolina, é mais simples do que a brasileira, pois não vem equipada com o sistema auxiliar de partida a frio, mas não permite aos motores operar até com etanol puro. Entretanto, com o desenvolvimento de sistemas de injeção mais avançados, em futuro próximo não haverá necessidade desses sistemas auxiliares, e a configuração adotada no Brasil poderá ser simplificada.

Quando o etanol é misturado à gasolina, resulta um novo combustível, com algumas características distintas do valor determinado pela ponderação direta das propriedades de cada componente, por causa do comportamento não-linear de certas propriedades.

Tabela 3 **– Exigências de alterações em veículos para diferentes teores de bioetanol na gasolina**

% de bioetanol na gasolina	Modificações em um veículo a gasolina pura											
	Carburador	Injeção de combustível	Bomba de combustível	Filtro de combustível	Sistema de ignição	Tanque de combustível	Conversor catalítico	Motor básico	Óleo do motor	Coletor de admissão	Sistema de escape	Sistema de partida a frio
≤ 5%	Para qualquer veículo											
≤ 10%		Para veículo produzido a partir de 1990										
≤ 25%	Veículo a gasolina brasileiro											
≤ 85%	Veículo flexível utilizado nos EUA e no Canadá											
≥ 85%	Veículo flexível utilizado no Brasil											

☐ Não são necessárias alterações ■ Provavelmente são necessárias alterações

Fonte: Elaborado com base em Joseph Jr. (2005).

É preciso recordar que, enquanto o etanol é uma substância química simples, a gasolina é sempre uma mistura com mais de 200 diferentes espécies de hidrocarbonetos derivadas do petróleo. São comentadas, a seguir, as principais propriedades das misturas gasolina/etanol e seu comportamento em aspectos ambientais.

Octanagem

Octanagem é a medida de resistência de um combustível à auto-ignição e à detonação, avaliada pelos métodos Motor (MON) e Research (RON), que permite inferir o comportamento de um motor alimentado com esse combustível, respectivamente, em condições de carga elevada ou carga constante. O etanol é, reconhecidamente, um excelente aditivo antidetonante e melhora a octanagem da gasolina-base de modo sensível. Exatamente por ter toda a gasolina aditivada com etanol, o Brasil foi um dos primeiros países do mundo a abolir

totalmente o chumbo tetraetila e somente adotou o MTBE de modo episódico e localizado, durante os anos 1990. Esses aditivos antidetonantes ainda são empregados em alguns países, mas acarretam problemas ambientais e estão em progressivo desuso. Como se pode observar pelos valores apresentados na Tabela 4, a adição de etanol afeta mais a octanagem RON do que a MON e constata-se, ainda, uma grande influência da composição da gasolina-base e, portanto, de sua octanagem original sobre o incremento da octanagem, devido ao etanol. Como regra geral e de clara importância, quanto mais baixa a octanagem da gasolina-base, mais significativo o ganho devido ao etanol.

Tabela 4 **– Efeito do bioetanol na octanagem da gasolina-base**

Composição da gasolina-base			Incremento da octanagem com:							
			5% de bioetanol		10% de bioetanol		15% de bioetanol		20% de bioetanol	
Aromáticos	Olefínicos	Saturados	MON	RON	MON	RON	MON	RON	MON	RON
50	15	35	0,1	0,7	0,3	1,4	0,5	2,2	0,6	2,9
25	25	50	0,4	1,0	0,9	2,1	1,3	3,1	1,8	4,1
15	12	73	1,8	2,3	3,5	4,4	5,1	6,6	6,6	8,6
11	7	82	2,4	2,8	4,6	5,5	6,8	8,1	8,8	10,6

Fonte: Carvalho (2003).

Volatilidade

Para que um combustível queime corretamente, é necessário que esteja bem misturado com o ar. Portanto, a facilidade de um combustível líquido em vaporizar-se é uma propriedade importante, que afeta diretamente diversos parâmetros de desempenho do veículo, como condições de partidas a frio ou a quente, aceleração, economia de combustível e diluição do óleo lubrificante. Exatamente por isso, os combustíveis derivados de petróleo devem apresentar uma composição equilibrada entre frações leves e pesadas, de modo a produzir uma curva de destilação, segundo a qual o produto começa a se vaporizar a temperaturas relativamente mais baixas e termina a temperaturas bem mais elevadas do que a temperatura ambiente. A adição de etanol tende a baixar a curva de destilação, especialmente em sua primeira metade, afetando a chamada temperatura T50, correspondente a 50% da massa evaporada, embora as temperaturas inicial e final de destilação sejam pouco afetadas. Nesse sentido, a adição de etanol é de reduzida importância para o comportamento dos motores.

Entretanto, uma propriedade importante e relacionada com a volatilidade – a pressão de vapor – é significativamente afetada pela adição de etanol. A pressão de vapor determina o nível das emissões evaporativas e a possibilidade de ocorrer formação de vapor nas linhas de alimentação de combustível, um problema minorado com a atual adoção de bombas de combustível no tanque, como ocorre na grande maioria dos veículos modernos. É interessante constatar que, embora a pressão de vapor da gasolina pura seja superior à do etanol puro,

como apresentado na Tabela 2, a adição de etanol à gasolina eleva a pressão de vapor da mistura. Esse incremento, tipicamente, apresenta um máximo em torno de 5% em volume de etanol na gasolina, reduzindo-se lentamente à medida que cresce o teor de etanol. A título ilustrativo, pode-se citar o exemplo de uma dada composição de gasolina que, recebendo 5% de etanol, tem sua pressão de vapor elevada para 7 kPa, enquanto, com 10% em volume, essa pressão vai a 6,5 kPa [Furey (1985)]. Esse efeito pode ser corrigido sem dificuldades, ajustando a composição da gasolina-base, de modo a garantir que a mistura cumpra com as especificações. No Brasil e em outros países que têm introduzido etanol na gasolina, a pressão de vapor tem sido especificada em níveis similares à gasolina pura. Em poucas palavras, o efeito do etanol sobre a pressão de vapor pode ser controlado sem maiores dificuldades.

Desempenho

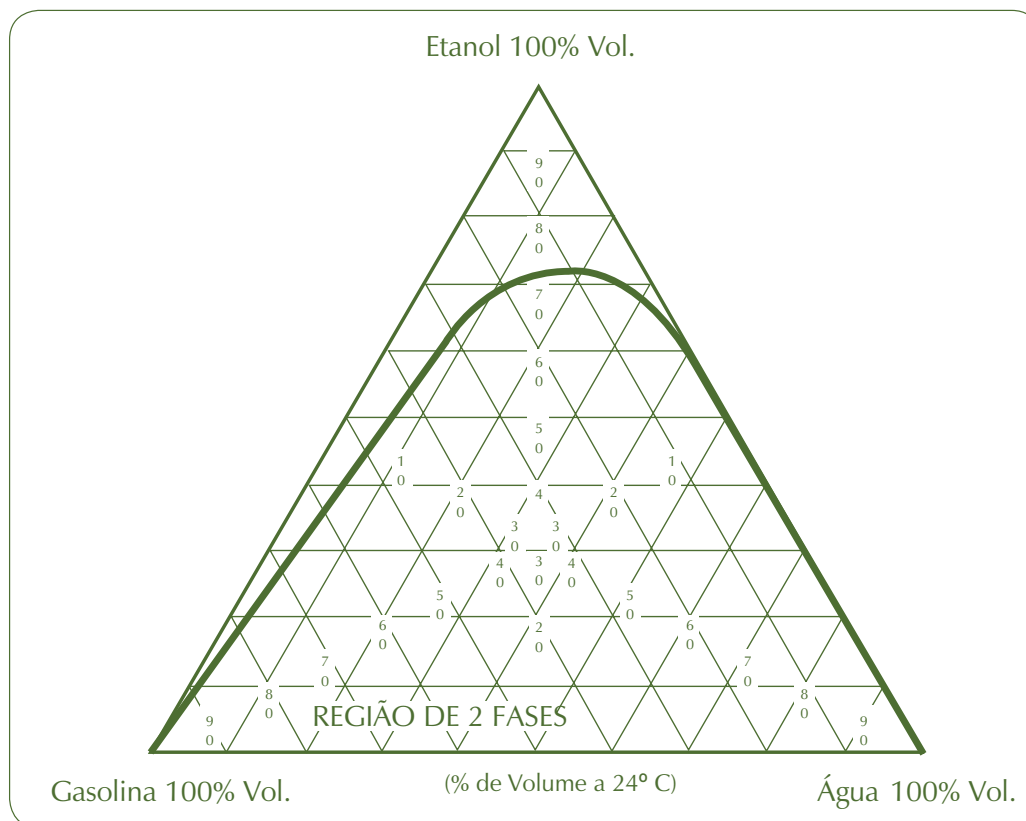
Como as misturas gasolina/etanol podem ser adequadamente ajustadas para atender às especificações típicas de uma gasolina pura, não existem, necessariamente, problemas de desempenho e dirigibilidade, desde que se cumpram os requisitos de qualidade especificados para os combustíveis. No entanto, comparado à gasolina pura, uma gasolina com 10% de etanol necessita de 16,5% mais calor para vaporizar-se totalmente, o que pode ser uma dificuldade real em temperaturas muito baixas [TSB (1998)]. Por outro lado, o maior calor de vaporização da gasolina aditivada com etanol é uma das razões principais para que a eficiência de um motor que utiliza esse combustível aumente entre 1% e 2% em relação ao desempenho com gasolina pura. Desse modo, mesmo que uma gasolina com 10% de etanol contenha 3,3% menos energia por unidade de volume, o efeito final sobre o consumo de combustível é menor e depende das condições particulares de uso [Orbital (2002)].

Esse ponto é relevante: em teores de até 10%, o efeito da adição de etanol sobre o consumo dos veículos é inferior à variação de consumo observada entre diferentes motoristas e, para efeitos práticos, um litro de gasolina aditivada com etanol produz praticamente os mesmos efeitos que um litro de gasolina pura [Salih e Andrews (1992) e Brusstar e Bakenhus (2005)]. Já para teores mais elevados, como 25% de etanol, correspondendo a um conteúdo energético em volume 10% inferior, observa-se um aumento médio no consumo da ordem de 3% a 5% sobre a gasolina pura. Esses resultados, confirmados em muitos ensaios de campo, indicam como o etanol, embora apresente menor poder calorífico, permite melhorar a eficiência do motor, graças à menor temperatura na admissão e ao maior volume dos produtos de combustão. Com o etanol puro hidratado, esse efeito é ainda mais sensível, desde que o motor seja corretamente adaptado para esse combustível, incrementando sua taxa de compressão: embora apresente um poder calorífico cerca de 40% inferior ao da gasolina, o efeito final nos motores atuais é um consumo de 25% a 30% mais elevado do que a gasolina.

A médio prazo, a adoção de conceitos mais avançados de engenharia de motores, como a injeção direta de combustível, taxas de compressão mais elevadas e sistemas de turboalimentação inteligentes, poderá trazer ganhos expressivos de consumo específico nos motores a etanol hidratado, até mesmo superando os valores obtidos com gasolina pura [Szwarc (2008)].

Separação de fases

A possibilidade de ocorrer uma separação de fases aquosas em uma mistura etanol/gasolina é, freqüentemente, mencionada como um problema para a adoção de etanol combustível. Existe um temor de que, de algum modo, a água seja introduzida com o etanol ou se condense no tanque de combustível de um veículo, ficando separada no fundo e causando problemas para o funcionamento normal do motor. A rigor, esse problema tende a ser tanto menor quanto maior for a adição de etanol à gasolina. Enquanto a gasolina pura praticamente não absorve água, o etanol anidro tem total afinidade com a água, fazendo com que as misturas gasolina/etanol apresentem uma capacidade de dissolver água diretamente proporcional ao teor alcoólico, como indicado no diagrama ternário apresentado na Figura 4. Quanto mais elevado o teor de etanol na gasolina, mais larga é a faixa que define a região na qual ocorre total solubilidade, como se observa na parte superior do diagrama. Sob temperaturas muito baixas, esse efeito é menos pronunciado, mas, de todo modo, o etanol sempre atua como um co-solvente entre a gasolina e a água, reduzindo os riscos de separação da fase aquosa da gasolina.

Figura 4 **– Solubilidade da água em misturas gasolina/etanol**

Fonte: CTC (1998).

A possibilidade de a gasolina com etanol apresentar uma solubilidade razoável para a água e o fato de termos temperaturas amenas no país explicam como funcionam sem problemas os veículos flexíveis no Brasil, onde podem ser abastecidos com qualquer mistura de gasolina (com 20% a 25% de etanol) e etanol hidratado, cuja água não se separa, exatamente, graças ao álcool previamente contido na gasolina. Caso a gasolina brasileira não contivesse um teor elevado de etanol anidro, sua mistura com etanol hidratado provavelmente levaria a uma separação de fases, especialmente em condições com temperaturas inferiores a 18° C. Portanto, não faz sentido imaginar que a adição de etanol anidro à gasolina cause problemas de separação de fases – na verdade, ela reduz tais problemas.

Compatibilidade de materiais

Alguns materiais plásticos mais antigos, utilizados em vedações, mangueiras e filtros, como a borracha natural e a borracha sintética butílica, tendem a se degradar mais rapidamente na presença de etanol. Entretanto, desde 1980, esses materiais têm sido substituídos por elastômeros fluorados, o que resolveu esse problema. A Tabela 5 apresenta os resultados de testes de durabilidade conduzidos pelo exército britânico [Orbital (2002)], confirmando a adequação ao etanol da maioria dos plásticos usados atualmente. Ainda nesse sentido, uma empresa de petróleo apresenta os seguintes comentários aos seus consumidores:

> De acordo com a nossa experiência não há um problema significativo de compatibilidade de gasolinas com oxigenados e elastômeros em carros mais antigos. Não houve um aumento nos problemas quando gasolina com etanol ou MTBE foram introduzidos em áreas metropolitanas em 1992, inclusive nas regiões com maiores proporções de carros antigos na frota [Chevron (2006)].

Com relação aos metais, em condições normais de uso, esses materiais estão sempre sujeitos à corrosão, sendo necessário sua adequada seleção e, eventualmente, o emprego de revestimentos protetores. Os metais considerados de baixa resistência ao etanol e suas misturas são as ligas para fundição por pressão (tipo Zamac) e algumas ligas de alumínio [Owen e Coley (1995)]. A agressividade do etanol depende do teor alcoólico na gasolina e está associada, particularmente, à presença de água, ácidos orgânicos e contaminantes. Para misturas de gasolina com 10% de etanol, o desgaste de componentes metálicos foi bastante estudado e é considerado irrelevante, comparado à gasolina normal. Em teores mais elevados, há um efetivo receio de problemas de compatibilidade e corrosão. Isso explica por que, durante os anos 1970, quando a gasolina brasileira passou a incorporar etanol em níveis mais elevados, introduziram-se, paulatinamente, diversas modificações nos sistemas de combustível dos veículos. Processos de recobrimento metálico e de proteção como niquelagem e cromação são comuns nos tanques de combustível dos automóveis brasileiros, sendo também crescente o uso de materiais plásticos para esses componentes.

Tabela 5 – **Durabilidade de materiais plásticos em bioetanol**

Plástico	Durabilidade
Polietileno convencional	Aceitável
Polipropileno	Aceitável
Polimetilpenteno (PMP)	Aceitável
Policarbonato	Aceitável
Cloreto de vinila (PVC)	Aceitável
Polietileno de alta densidade	Excelente
Politetrafluoretileno (Teflon)	Excelente

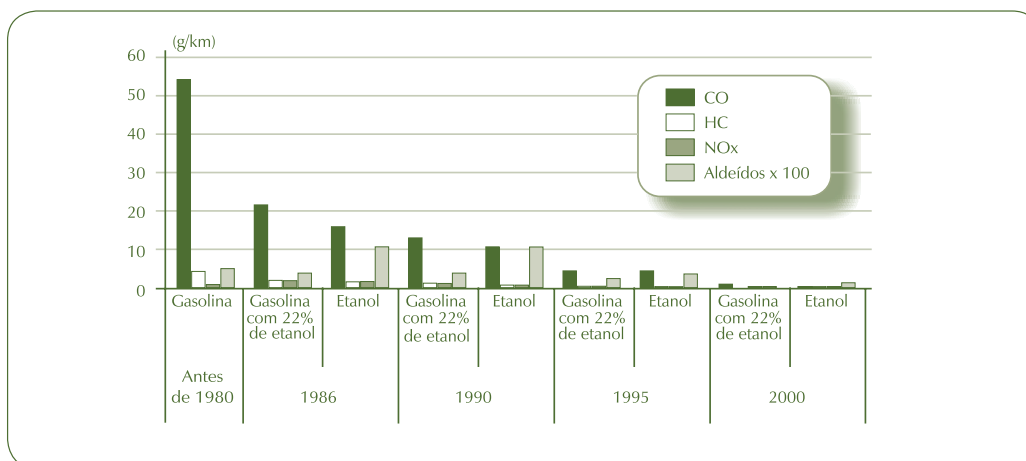
Fonte: Orbital (2002).

A maneira mais eficaz de reduzir os eventuais problemas de compatibilidade de materiais com etanol é mediante sua adequada especificação, estabelecendo níveis máximos de acidez total, pH, condutividade elétrica, bem como limites para alguns íons (cloretos, sulfatos, ferro, sódio e cobre). Por isso mesmo, são essenciais para o sucesso de um programa de etanol combustível a correta definição e a estrita observação da especificação desse biocombustível. Nesse sentido, é relevante a iniciativa de harmonizar as especificações do etanol combustível, como vem sendo conduzida por um esforço conjunto de Brasil, União Européia e Estados Unidos, com bons resultados [Gazeta Mercantil (2008)].

Emissões de gases de escape

Como conseqüência de sua composição, comparativamente às gasolinas típicas, a combustão da gasolina com etanol e do etanol puro em motores produz menores emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), hidrocarbonetos e outros compostos poluentes. Ao mesmo tempo, elevam-se os aldeídos (compostos do tipo R-CHO) e, dependendo das características do motor, os óxidos de nitrogênio (NO_x). Normalmente, os limites legais de emissão para veículos são atendidos em sua plenitude, sendo os benefícios resultantes do uso do etanol fato bastante conhecido.

É interessante observar que a motivação básica para a adição de etanol na gasolina de diversas regiões dos Estados Unidos, a partir dos anos 1990, foi exatamente a melhoria da qualidade do ar, associada à oxigenação promovida pelo etanol [Yacobucci e Womach (2002)]. Como os modelos mais antigos são mais poluentes, quanto mais antigo o motor (isto é, com carburador e sem catalisador), mais significativo é o potencial de vantagens ambientais proporcionadas pelo etanol frente à gasolina. Além disso, o etanol danifica menos o catalisador, em comparação com a gasolina, principalmente pelo fato de conter menos contaminantes, como o enxofre. No Gráfico 4, mostra-se como a emissão dos veículos produzidos no Brasil se reduziu ao longo das últimas décadas, por conta do desenvolvimento tecnológico dos motores e da introdução do etanol [Ibama (2006)]. Nesse gráfico, deve ser observado que os valores para os aldeídos estão multiplicados por 100, por serem bastante reduzidos.

Gráfico 4 – **Evolução das emissões de veículos novos no Brasil**

Fonte: Elaborado com base em Ibama (2006).

Em alguns estudos, sinaliza-se uma preocupação especial com as emissões de aldeídos associadas ao uso de etanol. Com efeito, essas substâncias apresentam potencial cancerígeno e podem se apresentar em teores mais elevados no escapamento dos motores que utilizam etanol do que naqueles a gasolina pura. Entretanto, os catalisadores – equipamentos instalados nos veículos norte-americanos a partir de 1975 e que passaram a ser progressivamente utilizados em todos os veículos comercializados em outras regiões do mundo e no Brasil a partir de 1997 – reduzem esses poluentes a níveis toleráveis, sem agravantes. Atualmente, a emissão média de aldeídos nos veículos novos brasileiros é de 0,014 g/km para os veículos a etanol e 0,002 g/km para os veículos a gasolina (a gasolina de referência para os testes de emissão contém 22% de etanol anidro), índices inferiores ao atual limite de 0,030 g/km estabelecido pela legislação ambiental brasileira, bem como ao futuro limite de 0,020 g/km, que passará a valer em 2009 [Ibama (2006)]. Diversas medições em cidades americanas, comparando a qualidade do ar antes e após a introdução mais massiva de 10% de etanol na gasolina, não indicaram qualquer incremento significativo na concentração atmosférica de aldeídos [Andersson e Victorinn (1996)]. A rigor, a maior fonte de aldeídos nos contextos urbanos têm sido os motores diesel [Abrantes et al. (2002)] e parecem ser bastante conclusivas as observações de um abrangente estudo desenvolvido na Austrália, segundo o qual a adoção de 10% de etanol na gasolina permite decrescer em 32% as emissões de CO, em 12% as emissões de hidrocarbonetos e em mais de 27% as emissões de aromáticos, reduzindo o risco carcinogênico em 24% [Apace (1998)].

Uso do etanol em motores diesel

Com relação ao uso de etanol em caminhões e ônibus, é interessante observar que os mesmos fatores que tornam o etanol especialmente apto a ser utilizado em motores com ignição por

centelha o fazem pouco atrativo para os motores com ignição por compressão (ciclo Diesel), geralmente empregados nesses veículos. Nesse caso, é necessário aditivar o etanol de forma intensa, para reduzir sua octanagem, ampliar sua cetanagem e seu poder lubrificante e, eventualmente, utilizar co-solventes, o que tem se mostrado pouco viável em termos econômicos. Não obstante, graças aos efeitos ambientais positivos, o uso de etanol em motores diesel otimizados para esse biocombustível já é uma realidade, em particular na Suécia, onde, há mais de 18 anos, diversos ônibus em uso regular em Estocolmo vêm utilizando etanol hidratado com cerca de 5% de aditivo em motores diesel [Ethanolbus (2008)]. Os resultados mostrados pelos 600 ônibus operando em oito cidades suecas têm sido estimulantes. Recentemente, foi lançada uma terceira geração de motores comerciais a etanol com 9 litros de deslocamento, 270 CV de potência e uma elevada taxa de compressão (28:1), atendendo às novas normas européias de emissões veiculares (Euro 5) [Scania (2007)], o que motivou um programa promovendo o uso do etanol para transporte coletivo em dez metrópoles de todo o mundo, em escala experimental, o Projeto Best (Bioethanol for Sustainable Transport) [Best (2008)].

O uso do etanol em motores diesel tem sido promovido, essencialmente, por seus benefícios ambientais, pois, embora a eficiência térmica com etanol se mantenha similar à do diesel (aproximadamente 44%), esses motores não permitem utilizar a vantagem de sua maior octanagem e apresentam consumos com etanol 60% superiores ao observado com diesel, por causa da diferença de poderes caloríficos entre esses combustíveis.

Ônibus com motor ciclo Diesel a etanol hidratado em Madri.

No Brasil, ainda nos anos 1980, desenvolveram-se diversas pesquisas sobre o uso de etanol em motores de maior porte, seja aditivando o etanol para uso em motores diesel, seja "ottolizando" esses motores, isto é, adaptando o sistema de alimentação de combustível e introduzindo sistemas de ignição com centelha, acumulando um razoável acervo de estudos,

mas sem resultados conclusivos [Sopral (1983)]. Na atualidade, é compreensível o interesse do próprio setor sucroalcooleiro em desenvolver essa aplicação para o biocombustível que produz. Estima-se que existam hoje cerca de cem mil motores diesel em operação nos caminhões e no maquinário agrícola das usinas brasileiras, que, mediante o uso de etanol substituindo o diesel, poderiam reduzir pela metade as despesas com combustível. Nesse sentido, o emprego de etanol aditivado em motores com injeção eletrônica e elevada taxa de compressão parece ser a tendência predominante [Idea (2008)].

A visão da indústria automobilística e dos usuários

Como uma última observação sobre a utilização de etanol como aditivo na gasolina e suas implicações sobre o desempenho e a durabilidade dos motores e veículos, cabe mencionar a Worldwide Fuel Chart (WWFC), um conjunto de especificações para combustíveis veiculares preparado por associações de fabricantes de automóveis dos Estados Unidos (Alliance of Automobile Manufacturers – Alliance), da Europa (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles – ACEA) e do Japão (Japan Automobile Manufacturers Association – Jama) e pela associação de fabricantes de motores Engines Manufacturers Association (EMA), que representam bem a posição da indústria automobilística mundial como uma proposta para os produtores de combustível [Autoalliance (2006)]. Segundo tal proposta, a presença de etanol até 10% é bem aceita como um oxigenante para a gasolina, com recomendação expressa de que seja um produto que cumpra com as especificações de qualidade.

Na atualidade, praticamente todos os fabricantes de veículos, independentemente de o etanol estar ou não presente na gasolina que será empregada, procuram produzir seus modelos em condições de usar os novos combustíveis. Nessa direção, os manuais do proprietário dos veículos esclarecem as vantagens da presença do etanol na gasolina. Indica-se, por exemplo, que a "Toyota permite o uso de gasolina oxigenada com até 10% de etanol. Esse combustível possibilita um excelente desempenho, reduz as emissões e melhora a qualidade do ar" [Toyota (2007)]. Apesar de o WWFC limitar sua recomendação ao E10, algumas iniciativas internacionais a favor de misturas com 20% de etanol anidro (E20) vêm sendo discutidas. Na Tailândia e no estado norte-americano de Minnesota, por exemplo, pretende-se adotar uma mistura com 20% de etanol. Como resposta a essas tendências, já há modelos sendo comercializados na Tailândia, como o Ford Escape e o Ford Focus, compatíveis com o E20. A Ford reconhece que a experiência acumulada no mercado brasileiro permitiu desenvolver rapidamente as versões para o mercado tailandês.

A introdução mais generalizada do etanol como aditivo à gasolina enfrenta ainda sérios preconceitos em alguns países onde essa tecnologia poderia ser implementada de modo imediato, como uma alternativa energética renovável e um componente importante do desenvolvimento local. Sem bases científicas, são gerados temores entre os consumidores quanto à durabilidade e ao desempenho de seus automóveis, criando uma barreira cultural que deve ser rompida pela informação clara e objetiva aos interessados. A concepção de que o etanol é um bom aditivo e um bom combustível, para o consumidor e para a sociedade, está

O etanol em motores aeronáuticos

Avião agrícola Embraer Ipanema a etanol hidratado.

O uso de etanol hidratado como combustível aeronáutico é uma realidade comum no interior do Brasil, que confirma a adequação e o desempenho desse combustível em motores alternativos. Desde 2005, a Embraer, empresa aeronáutica brasileira, produz o Ipanema, um avião agrícola especificamente preparado e regularmente homologado para utilizar etanol hidratado, fornece *kits* para adaptação de aviões agrícolas a gasolina para etanol e atualmente está desenvolvendo sistemas *flex-fuel* para motores aeronáuticos, visando atender aviões agrícolas e de pequeno porte com motor a pistão, cuja frota atual no Brasil é de cerca de 12 mil aeronaves [Scientific American Brasil (2006)]. O uso do etanol hidratado permite expressiva economia operacional, pois reduz em mais de 40% o custo por quilômetro voado e incrementa em 5% a potência útil do motor [Neiva Embraer (2008)], motivando o surgimento de empresas especializadas em converter e homologar aviões de pequeno porte para o uso desse biocombustível [Aeroálcool (2008)]. Nos Estados Unidos, desde 1980 são conduzidas experiências com etanol em aviões: em 1989, a Federal Aeronautic Authority (FAA) certificou, pela primeira vez, um motor aeronáutico para etanol (Lycoming IO-540, injetado) e, nos anos seguintes, certificou outro motor (Lycoming O-235, carburado) e dois modelos de aviões, o Cessna 152 e o Piper Pawnee (avião agrícola), para o uso de etanol anidro com 5% de gasolina (E95) [Bias (2006)].

demonstrada, de forma inequívoca, pelos resultados de centenas de estudos sobre sua plena adequação aos motores de combustão interna e, principalmente, pela realidade de milhões de veículos funcionando atualmente sem problemas com esse biocombustível, em uma diversificada mostra de países, com frotas heterogêneas e de idades variadas, introduzindo efetivamente o uso de combustíveis renováveis sem maiores transtornos em variados contextos.

2.2 Aspectos econômicos e institucionais do etanol combustível

Após serem revisados, no tópico anterior, os aspectos técnicos que fundamentam a adoção do etanol combustível, é interessante comentar como, em condições de mercado, se formam os preços dos biocombustíveis, em particular, do bioetanol. Os mercados de combustível da maioria dos países evoluíram nas últimas décadas para mercados com preços livres, determinados pelos agentes econômicos ou emulando os mercados mais competitivos, segundo os denominados preços de paridade. Nesse contexto, os preços do bioetanol para o consumidor serão determinados pelos preços ao produtor, que, por sua vez, deverão ser definidos segundo as cadeias produtivas e logísticas adotadas, incorporando os tributos devidos e as margens de comercialização. Essa análise é essencial para delimitar a efetiva viabilidade do bioetanol e os impactos de sua adoção no mercado consumidor.

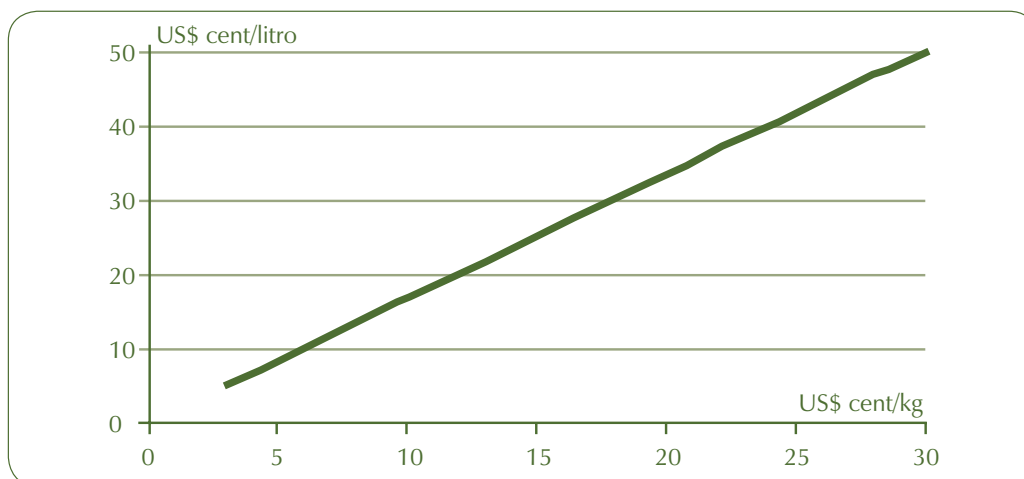
Como será apresentado no próximo capítulo, a produção de bioetanol pode ser efetuada com diversas matérias-primas, a cada qual correspondendo um custo de produção e um valor de mercado, que equivale ao preço de oportunidade na formação dos preços do bioetanol. Assim, o preço mínimo do bioetanol para os produtores deve atender a esses dois pressupostos: a) cobrir os custos de produção, que, naturalmente, incluem os custos da matéria-prima e a operação da planta de produção, bem como os custos de capital correspondentes aos investimentos produtivos realizados; e b) ser igual ou superior aos resultados que seriam obtidos caso a matéria-prima se destinasse à fabricação de produtos alternativos. No caso do bioetanol de cana-de-açúcar, os produtos alternativos a considerar são, basicamente, o açúcar e o melaço, um subproduto inevitável da indústria açucareira, com aplicações como insumo industrial e alimento animal.

Tendo em conta as equações químicas da transformação da sacarose em bioetanol, tem-se que 1 kg de açúcar permite, teoricamente, a produção de 0,684 litro de bioetanol anidro. Considerando as eficiências típicas de fermentação e destilação de 90% e 98%, respectivamente, obtêm-se a correlação a seguir e o Gráfico 5, que permite estimar o preço de indiferença do bioetanol anidro (PIEa) frente aos preços do açúcar (PAç):

$$\text{PIEa (\$/litro)} = 1{,}67 * \text{PAç (\$/kg)} \qquad (2)$$

Nessa expressão, considera-se apenas o valor da sacarose, sem incluir os custos associados ao investimento e à operação da unidade produtora. Não obstante, esse preço de indiferença é um dado importante para o produtor: em princípio, só faz sentido produzir bioetanol a pre-

ços superiores a tal preço. Naturalmente, essa relação física perde sentido em casos-limite, por exemplo, quando o mercado de açúcar se satura e a possibilidade de reduzir a produção de bioetanol para fabricar mais açúcar se torna pouco atrativa, já que os preços do açúcar tendem a baixar por excesso de oferta.

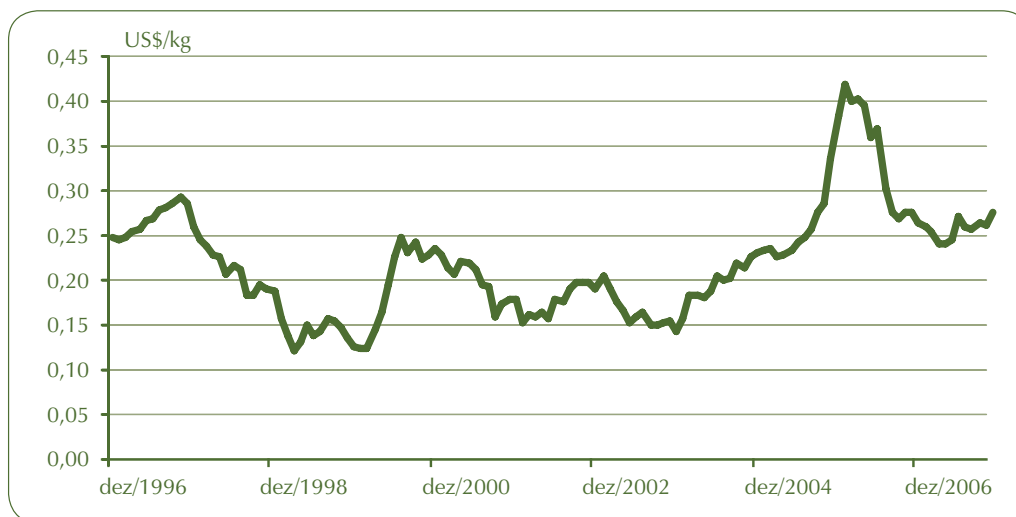
***Gráfico 5* – Preço de indiferença do etanol anidro em função do preço do açúcar**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

O uso de melaço ou mel esgotado – subproduto da produção de açúcar – na produção de bioetanol também permite uma análise similar, que favorece, nesse caso, o bioetanol, pois o preço do melaço é sempre inferior ao preço do açúcar. Entretanto, as disponibilidades de melaço são sempre determinadas pela produção de açúcar e podem ser consideradas limitadas pelas necessidades de produção de bioetanol em programas de maior envergadura. Com efeito, enquanto, com base no caldo direto, produzem-se mais de 80 litros de bioetanol por tonelada de cana, por meio do melaço esgotado, são produzidas cerca de 12 litros por tonelada de cana processada, além do açúcar fabricado. De todo modo, constata-se que, na maioria dos países latino-americanos com produção açucareira, o melaço poderia constituir uma fonte de bioetanol relevante e precursora para o atendimento das necessidades internas de combustível. Por exemplo, nos países centro-americanos, apenas com o uso do melaço disponível e sem cultivar um hectare adicional de cana, seria possível atender a 22% da demanda de bioetanol necessária para promover a introdução de 10% desse biocombustível na gasolina consumida, totalmente importada por esses países [Horta Nogueira (2004)].

Naturalmente, a essa avaliação da viabilidade da produção de bioetanol, superpõem-se outras considerações, como compromissos e estratégias de mercado. Além disso, deve-se levar em conta a variação que os preços do açúcar têm apresentado em tempos recentes, como, de resto, outras *commodities*. Outra complicação inescapável tem a ver com a relativa rigidez dos mercados internacionais de açúcar, com um volume apreciável de produto comerciali-

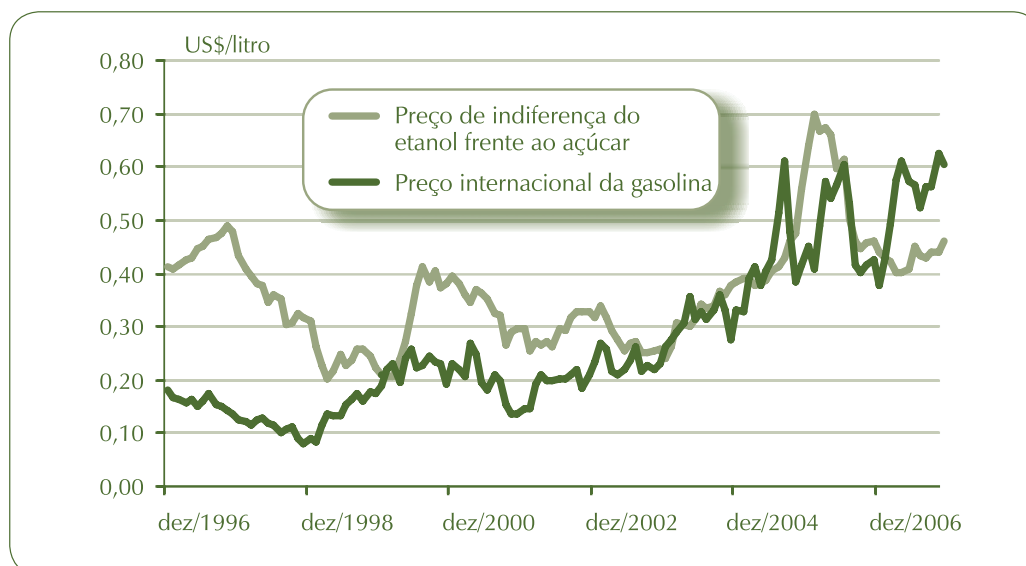
zado mediante cotas a preços que pouco refletem as pressões de oferta e demanda. Há uma justa expectativa dos países em desenvolvimento de que essas distorções se reduzam progressivamente, introduzindo mais eficiência e realismo no mercado açucareiro. Um estudo recente do Banco Mundial, utilizando diferentes cenários de mercado, apresenta simulações do comportamento dos preços do açúcar caso sejam liberados os mercados, apontando elevações de apenas 2,5% frente aos preços médios atuais. As vantagens mais expressivas ocorrem nos países da América Latina e da África ao sul do Saara [World Bank (2007b)].

Duas referências importantes para os preços internacionais do açúcar são: a) contratos preferenciais com os Estados Unidos, dentro das quotas estabelecidas pelo Departamento de Agricultura norte-americano, com preços determinados pelos Contratos nº 14 da Junta de Comércio de Nova York (New York Board of Trade – NYBOT), e com a Europa, no âmbito dos acordos ACP (Africa, Caribbean and Pacific) e SPS (Special Protocol Sugar), limitados por quotas atribuídas aos países produtores; e b) contratos livres ou de excedentes, que podem seguir os preços dos Contratos nº 5 da Bolsa de Londres ou os Contratos nº 11 da NYBOT. Embora, em ambos os casos, esses contratos definam preços de referência para o comércio internacional, com base em operações realizadas eletronicamente em tais bolsas de mercadorias, os contratos preferenciais correspondem a preços mais elevados e mercados menores, enquanto os contratos livres representam melhor a realidade do mercado internacional do açúcar. O Gráfico 6 apresenta o comportamento dos preços do açúcar segundo o Contrato nº 11 da NYBOT para os últimos dez anos, quando os preços sofreram expressivas variações, com alguma elevação do preço médio.

***Gráfico 6* – Preço internacional do açúcar (Contrato nº 11 NYBOT)**

Fonte: NYBOT (2008).

Tomando os preços do Gráfico 6 e aplicando na expressão anterior, podem ser estimados os preços mínimos de atratividade para o bioetanol, capazes de estimular os produtores a

utilizar preferencialmente sua matéria-prima na fabricação do biocombustível. Considerando ainda que, em misturas até 10%, um litro de etanol produz o mesmo efeito que um litro de gasolina, como comentado anteriormente, podem-se comparar tais preços de indiferença diretamente com os preços da gasolina (sem tributos, igualmente no atacado) praticados no mercado internacional. O Gráfico 7 apresenta essa comparação, utilizando para o derivado de petróleo o preço livre da gasolina regular na costa do Golfo (U.S. Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB).

***Gráfico 7* – Preço de indiferença do etanol frente ao açúcar e preço internacional da gasolina**

Fonte: Calculado com base em NYBOT (2008) e EIA (2008).

A diferença entre as curvas do Gráfico 7 evidencia bem como evoluiu a atratividade da produção de bioetanol com base na cana nos últimos dez anos, para ser usado como aditivo em gasolina. Podem ser identificadas claramente duas fases: o período anterior a 2003 e os anos sucessivos a 2003. Na primeira fase, os preços da gasolina ficaram quase sempre abaixo do valor de oportunidade do bioetanol, calculado com base no preço internacional do açúcar. Nesse período, a produção de bioetanol dependeu, em muitas situações, de subsídios que cobrissem esse diferencial de atratividade e que se justificaram pelas reconhecidas externalidades positivas do bioetanol: menores emissões atmosféricas, geração de empregos e redução da dependência externa no suprimento energético. No período seguinte, os preços se aproximam bastante e, salvo alguns meses em que a gasolina esteve mais barata, a fabricação de bioetanol passou a ser mais compensadora do que a produção de açúcar a preços

internacionais. Nesse sentido, espera-se que os custos de produção estejam cobertos e que o bioetanol passe a ser o produto mais interessante, desde que precificado como exposto.

É importante que algumas ressalvas sejam feitas em relação ao raciocínio anterior. Primeiro, os preços internacionais da gasolina não são exatamente aqueles praticados como preço básico na maioria dos países, sobretudo nos países importadores, em que os preços internos são definidos incorporando fretes marítimos e os custos adicionais de internação desses produtos, elevando a curva de preços da gasolina. Por outro lado, a consideração dos preços internacionais do açúcar como referência de oportunidade para a cana tampouco leva em conta os descontos que devem ser aplicados na eventual exportação. A análise anterior também não considerou as matérias-primas de baixo preço, como o melaço, que possibilitam a produção a preços mais baixos. De todo modo, essa comparação expedita mostra como vem se ampliando a margem de atratividade do bioetanol, o qual atinge condições de contestar efetivamente os mercados de gasolina, na acepção de Baumol (1982). Além disso, é preciso considerar que a expansão do mercado de açúcar encontra limites, enquanto o mercado de bioetanol tem um potencial de expansão praticamente ilimitado.

Para as condições dos produtores do Estado de São Paulo, o Anexo 3 apresenta a série de preços pagos aos produtores de bioetanol (anidro e hidratado) entre 1975 e 2006, de onde se depreende que esse biocombustível tem sido vendido, ex-tributos, a valores bem próximos dos preços da gasolina, fazendo com que a eventual adoção de misturas bioetanol/gasolina não provoque variações significativas de preços para os consumidores.

Enquanto o limite inferior da faixa de variação de preços ao produtor de bioetanol é dado pelo maior valor entre os custos de produção e de oportunidade dos produtos alternativos da matéria-prima utilizada pela agroindústria, o limite superior depende efetivamente das condições de mercado, na ausência de mecanismos de intervenção. Assim, e de modo compreensível, o produtor de bioetanol buscará maximizar seus resultados e colocar seu produto ao valor mais elevado possível, mas deverá ter seu comportamento balizado pela presença de outros produtores e, eventualmente, importadores, que irão limitar suas margens a níveis razoáveis. Esse aspecto ressalta a necessidade de que os mercados de bioetanol sejam promovidos em bases competitivas, até mesmo mediante a possibilidade de importação, para evitar práticas monopolistas e promover a redução dos custos.

Nesse contexto econômico favorável e de interesse dos consumidores, é oportuno revisar brevemente o papel do Estado como promotor do desenvolvimento do mercado de bioetanol. Dificilmente, o bioetanol poderá se inserir no mercado de combustíveis de um país sem um claro suporte governamental, que, por meio da compreensão da relevância dos benefícios e de uma visão estratégica, coordene esforços e defina objetivos. Considerando como passo inicial e imprescindível a introdução do uso de bioetanol anidro como aditivo à gasolina, que dará espaço no futuro eventual ao uso do bioetanol puro, alguns pontos são absolutamente essenciais. Primeiro, no que tange ao mercado de combustíveis, cabem a definição de uma especificação para o bioetanol e o estabelecimento de um nível de mistura

de bioetanol à gasolina, a ser implementado de forma progressiva e, eventualmente, com parcial abrangência geográfica, mas que contemple em médio prazo todas as regiões e todas as gasolinas. As experiências em curso, com inegável êxito, na Colômbia e na Costa Rica, por exemplo, oferecem uma excelente referência dos cronogramas e procedimentos [Horta Nogueira (2007)]. Muitas vezes, tais determinações – em particular, prevendo o uso do bioetanol na gasolina – requerem alterações no marco legal e regulatório, embora se deva lembrar que as mudanças introduzidas periodicamente nas especificações da gasolina, como a retirada do chumbo tetraetila, a introdução do MTBE e as reduções do teor de benzeno ou enxofre, como efetuado em diversos países, foram, em muitos casos, objeto de normas, decretos e resoluções de menor complexidade legislativa.

Como segundo ponto essencial para a atenção dos governos, tem-se a definição de um marco tributário específico para o bioetanol, que, respeitando as necessidades de equilíbrio fiscal, reconheça que se trata de um produto com vantagens no uso, comparativamente à gasolina, como já observado. Nesse sentido, sugere-se uma tributação diferenciada e que proporcione o estímulo suficiente para que as incertezas e percepções de risco sejam superadas, promovendo a necessária dinâmica para que os agentes econômicos na cadeia de produção e distribuição dos combustíveis avancem e sejam também agentes ativos do processo de motivação dos consumidores para a adoção do bioetanol.

Novamente, deve-se mencionar a experiência recente de países nos quais o uso do bioetanol tem sido implementado. Em todos os casos, adotam-se, com sucesso, mecanismos tributários diferenciados, aplicando-se alíquotas que tornam indiferente ou mesmo atrativo para o consumidor final o uso do bioetanol. Embora, como se observa em todo o setor energético, exista uma razoável assimetria de informações entre os agentes econômicos e o governo, dificultando uma definição clara dos custos a considerar, o nível de amadurecimento já atingido pelo mercado de bioetanol em alguns países e no mercado de combustíveis, de um modo geral, faculta a formatação de marcos tributários suficientemente robustos nesse campo. Nesse contexto, deve-se ressaltar a relevância da articulação da produção de bioetanol com o desenvolvimento local, por meio do estímulo às atividades econômicas a montante e a jusante da produção agroindustrial, da geração de empregos e do incremento da renda etc., além da economia de divisas, no caso de país importador de petróleo, ou do aumento nas receitas de exportação, para os exportadores de combustíveis.

Naturalmente, tomada a decisão de aditivar a gasolina com bioetanol e estabelecidas as condições legais para que essa alteração seja compulsória, os ajustes no marco tributário não são imprescindíveis, já que o preço da gasolina passará a incorporar o bioetanol como novo elemento de custo, freqüentemente marginal. Entretanto, impostos e taxas sobre os combustíveis são instrumentos efetivos de política energética e devem ser utilizados até mesmo para a implementação consistente do emprego do bioetanol combustível.

Cabe ainda observar que, nos casos em que o desenvolvimento do mercado de bioetanol já alcançou a comercialização de etanol hidratado e já dispõe de uma frota significativa de veículos flexíveis, como ocorre no Brasil, os mecanismos regulatórios e tributários são, ne-

cessariamente, mais complexos e a formação de preços se sujeita a outros condicionantes e padrões. Por exemplo, dentro de limites, é o preço da gasolina que tem definido o preço do bioetanol no Brasil nos últimos meses, constituindo o teto a ser respeitado pelos produtores interessados em proteger seu mercado consumidor. Esse mercado conta com um crescente número de veículos flexíveis, que poderão migrar para a gasolina caso o preço do bioetanol ao consumidor, por litro, ultrapasse cerca de 70% do preço da gasolina nos postos revendedores. Por outro lado, o preço do bioetanol também limita a elevação do preço da gasolina, já que os consumidores que, eventualmente, usam gasolina deixarão de fazê-lo caso o bioetanol lhes pareça mais atrativo. Essa arbitragem exercida pelo consumidor leva em conta os custos finais na utilização dos combustíveis, que são, por sua vez, uma conseqüência das diferenças de consumo por quilômetro percorrido, e tem constituído um efetivo estabilizador dos preços dos combustíveis no Brasil, mesmo em tempos de altos preços do barril de petróleo.

2.3 Cadeias logísticas para o etanol

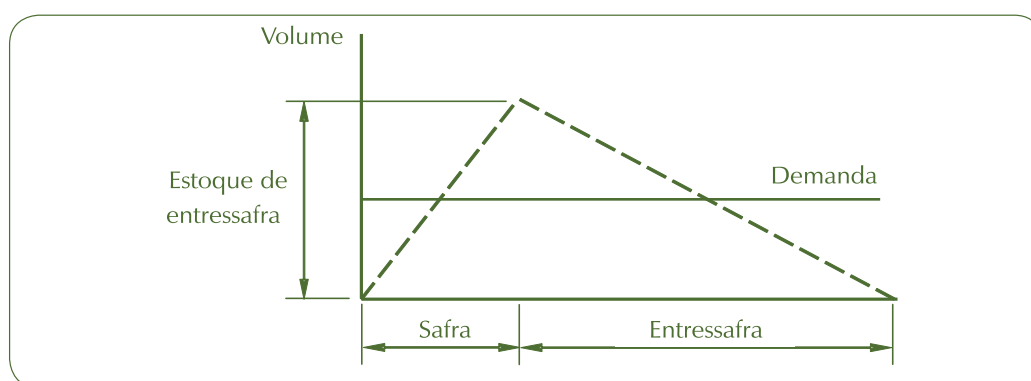
Apresentados os condicionantes de ordem técnica e econômica e estabelecido um marco referencial para a promoção do uso do etanol, é interessante comentar os requerimentos de infra-estrutura e logística para sua efetiva implementação. Em muitos países, reconhece-se que o etanol deveria e poderia participar da matriz energética, mas são apontados obstáculos na infra-estrutura e carência de recursos para sua superação.

De modo geral, as condições de transporte e armazenamento do etanol, puro ou misturado à gasolina, não são, essencialmente, diferentes das empregadas com os combustíveis derivados de petróleo. Contudo, existem, pelo menos, três fatores particulares e importantes a considerar: a sazonalidade da produção de etanol, a dispersão espacial dessa produção e a compatibilidade dos materiais dos tanques e tubulações que estarão em contato com o etanol e suas misturas. Esses temas serão comentados a seguir, considerando o contexto da agroindústria de etanol com base na cana-de-açúcar.

Como não se pode armazenar a cana-de-açúcar por mais do que poucos dias, para a cana colhida manualmente, e apenas por algumas horas, para a cana picada, colhida com máquinas, apenas durante os meses de colheita há produção de etanol, produto que, por sua vez, é consumido regularmente ao longo de todo o ano. Em tal contexto, é evidente a importância da duração da safra de cana. São sempre interessantes safras mais longas, que permitem melhor utilização da capacidade de produção instalada e menor necessidade de armazenamento para o período de entressafra. Nesse sentido, a produção de bioetanol de milho ou de mandioca (com raspas secas) apresenta vantagens, já que a matéria-prima é armazenável.

Em uma modelagem simples das relações entre capacidade de produção, estoques e demanda de bioetanol, como apresentado na Figura 5, indica-se como ocorrem a formação e o consumo do estoque de entressafra. Nessa figura, a capacidade de produção adicional ao

consumo para atender à demanda de entressafra associa-se à inclinação de curva de produção durante a safra, sinalizando graficamente o impacto de sua duração. Com base nesse modelo e considerando uma demanda anual de um milhão de metros cúbicos de bioetanol, ao estender as safras de 150 dias para 200 dias, a tancagem exigida para atender a uma demanda constante se reduziria de 589 mil litros para 452 mil litros, correspondente a uma redução de 23%. Da mesma forma, essa extensão de safra permitiria reduzir a capacidade diária de produção de 6,6 mil litros para 5 mil litros, para atender idêntico mercado.

***Figura 5* – Modelo de produção, estoque e demanda de etanol**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

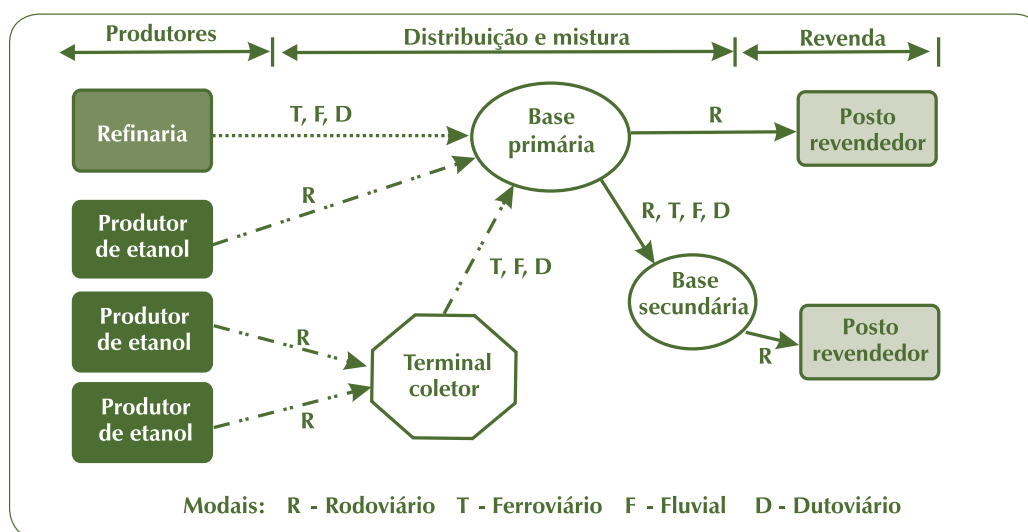
Esses valores são exercícios teóricos. Na realidade, além das variações de produção e demanda ao longo dos meses, diversos fatores de incerteza, notadamente climáticos, recomendam que se mantenha um estoque de segurança, para enfrentar contingências no abastecimento. Assim, no início da safra, geralmente, existem ainda estoques de bioetanol da safra anterior.

Uma forma importante de enfrentar as incertezas no abastecimento de bioetanol destinado à mistura com gasolina é a variação dos teores de bioetanol em função das disponibilidades desse produto, dentro de uma faixa na qual os motores de combustão não apresentarão problemas. Esse procedimento vem sendo usado rotineiramente pelas autoridades brasileiras para a gestão dos estoques de bioetanol, ajustando conforme as necessidades o teor de bioetanol entre 20% e 25%.

Por ser produzido de modo relativamente disperso, com marcada sazonalidade, em unidades situadas na zona rural, susceptível às condições climáticas e devendo ser misturado à gasolina, o bioetanol impõe uma infra-estrutura logística mais complexa do que os derivados de petróleo. A movimentação de quantidades importantes desse combustível – com a garantia de qualidade (especialmente o teor de água e impurezas) e sem afetar as instalações que servem também a outros produtos – implica um adequado planejamento e o correto desenho dos sistemas e processos, para que exista funcionalidade sob custos toleráveis. Isso não

configura um desafio muito diferente dos usualmente enfrentados pela agroindústria, em geral, que nesse caso deve somar competências com a área de distribuição de combustíveis. No contexto brasileiro, os estoques de bioetanol mantidos pelas distribuidoras são suficientes para uma ou duas semanas de consumo, sendo repostos regularmente pelos produtores, sem problemas notáveis.

É interessante entender como se processam o armazenamento e o transporte de bioetanol no Brasil, onde quase dois milhões de metros cúbicos de produto são movimentados mensalmente, a partir de mais de 350 unidades produtoras, com um sistema bastante diversificado de modais de transporte e armazenamento intermediário [Cunha (2003)]. Nesse sistema, destacam-se nove terminais de coleta de bioetanol nas principais regiões produtoras (estados de São Paulo, Goiás, Paraná e Sergipe), com uma capacidade total de armazenamento de 90 mil metros cúbicos. O bioetanol das usinas produtoras é recebido por modal rodoviário e despachado através de meios de transporte mais econômicos – que podem ser o ferroviário, o fluvial ou o dutoviário – para os terminais ou as bases primárias das distribuidoras de combustível, onde se realiza a mistura com gasolina. A gasolina com bioetanol é, então, distribuída para as bases secundárias ou diretamente para os 35,5 mil postos revendedores das diversas bandeiras nacionais e multinacionais, empregando novamente diferentes modais de transporte, da forma mais conveniente ou disponível, como sintetizado na Figura 6.

***Figura* 6 – Logística da gasolina e do etanol no Brasil**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Mesmo com tal diversidade de opções, 70% do volume de bioetanol comercializado no Brasil (inclusive bioetanol hidratado) é movimentado desde o produtor até as bases primárias e daí aos postos revendedores utilizando somente caminhões-tanque, com capacidade de até 30 mil litros. Nem todo bioetanol anidro é comercializado através dos terminais de coleta, já que uma parte da

produção segue por rotas mais diretas, sobretudo nas regiões mais distantes ou em mercados de menor expressão, embora sempre e necessariamente passe pelas bases primárias para a mistura com gasolina, uma exclusividade legal das distribuidoras de combustível.

Essa opção brasileira de permitir a mescla do etanol anidro com a gasolina apenas pelas distribuidoras foi determinada, essencialmente, por aspectos tributários (simplificação do recolhimento de tributos), já que, em princípio, a mistura de bioetanol e gasolina poderia ser efetuada nas usinas produtoras, nas refinarias ou, mesmo, nos postos revendedores, no momento de abastecer os veículos. Não obstante, existem outras justificativas importantes, como a descentralização da produção de bioetanol e sua proximidade das bases de distribuição, bem como a necessidade de contar com uma clara e inequívoca atribuição de responsabilidades quanto à especificação de qualidade do combustível, um aspecto essencial. Nesse sentido, o modelo de operação empregado no Brasil deixa bem claro: as refinarias produzem gasolina, as usinas produzem bioetanol anidro e as companhias de distribuição de combustíveis preparam a mistura dessas duas correntes. Esse último agente econômico, as distribuidoras, está encarregado de avaliar o produto que recebe (gasolina e bioetanol) e também responde pela qualidade do produto que entrega. Outros modelos operacionais podem ser estabelecidos, mas é fundamental que a cadeia de responsabilidades sobre a qualidade do combustível esteja bem definida e seja monitorada adequadamente pelo governo [ANP (2008)].

Em termos práticos, a preparação da mescla de gasolina e bioetanol nas bases de distribuição efetua-se em tanques de grande capacidade – alimentando-se continuamente com gasolina e bioetanol, sob estrito controle de processo de mistura e qualidade – ou no próprio caminhão-tanque, cujos movimentos durante o transporte garantem a necessária homogeneidade do combustível após alguns minutos de trânsito normal. Essa última maneira de preparar a mistura gasolina/etanol é conhecida em inglês como *splash blending* e pode ser adotada a custos baixos. Cabe observar que a medição do teor de etanol na mistura é efetuada com rapidez e suficiente exatidão por um método bastante simples e direto (absorção do etanol presente na gasolina mediante sua mistura com água salgada e medição de volumes correspondentes em bureta). Esse procedimento expedito, utilizado também em postos de gasolina, é padronizado pela norma brasileira ABNT NBR 13.992: Gasolina Automotiva – determinação do teor de álcool etílico anidro combustível, revisada em 1997.

Para a adaptação completa (tanques, sistemas de mistura e controle) de quatro bases de distribuição para introduzir 7% de bioetanol na gasolina consumida na Costa Rica, implicando 60 milhões de litros de bioetanol por ano, foi estimado um custo total de US$ 5 milhões, que representam 3% dos gastos realizados por esse país em 2006 para a importação de combustíveis [Ulate (2006)].

Quando se trata de movimentar volumes expressivos, o uso de dutos para o transporte do bioetanol e da gasolina com bioetanol pode ser o mais recomendável, embora alguns operadores afirmem ser inadequado seu uso com etanol. Com efeito, por ser potencialmente mais corrosivo e atuar como solvente seletivo, além de absorver mais água que os derivados de pe-

tróleo, o etanol impõe cuidados adicionais, como o controle sistemático do estado dos dutos e sua limpeza acurada para evitar arrastes indesejáveis. De todo modo, essas dificuldades têm sido superadas e esse modal vem sendo crescentemente utilizado com esse biocombustível, no Brasil e nos Estados Unidos [API (2007)]. Nesse sentido, é importante mencionar que a Petrobras desenvolveu uma grande experiência com esse biocombustível nas últimas décadas, movimentando anualmente alguns milhões de metros cúbicos de bioetanol. Foram publicados mais de 200 trabalhos técnicos e emitidos mais de 40 procedimentos operacionais sobre temas técnicos na logística do bioetanol no contexto da indústria do petróleo. Ainda segundo essa empresa, em 30 anos de operação de dutos com expressivos volumes de bioetanol, não foram observadas ocorrências de corrosão sob tensão (*stress corrosion cracking* – SCC), risco apontado como potencialmente associado a esse produto [Gomes (2008)].

Diversos projetos estão atualmente em desenvolvimento no Brasil para expandir a capacidade dutoviária para bioetanol, prevendo até dutos de longa distância dedicados exclusivamente ao bioetanol para exportação. Uma grande companhia operadora de oleodutos nos Estados Unidos, a Williams Energy Services, informa ter despachado regularmente e sem problemas gasolina com bioetanol em suas linhas [Whims (2002)], enquanto têm sido lançados projetos para dutos exclusivos para bioetanol nos Estados Unidos [Mears (2007)].

Os aspectos logísticos devem ser considerados relevantes para o bom desenvolvimento de programas de uso de bioetanol combustível. As questões variam caso a caso e soluções específicas têm sido implementadas com sucesso, sempre associadas a um adequado planejamento. As dificuldades encontradas em contextos tão diferentes quanto os Estados Unidos [Keese (2003)] e a Índia [Balaji (2002)], durante a introdução do uso mais extensivo de bioetanol há alguns anos, foram basicamente associadas a limitações logísticas, pela falta de suficiente infra-estrutura de transporte e armazenamento do biocombustível. Tais experiências recomendam, expressamente, implementar esses programas em etapas, reforçando progressivamente as capacidades, para conquistar, aos poucos, maior confiança do mercado e dos consumidores.

Dois fatores fundamentais para o sucesso do uso do bioetanol no Brasil, que diferenciam, fundamentalmente, a experiência brasileira daquela registrada em outros países, são a ampla cobertura geográfica e o elevado número de postos de abastecimento de combustível que comercializam o produto. Como visto, na atualidade, todos os 35.500 postos revendedores de combustível no país comercializam o bioetanol hidratado e a mistura de gasolina e bioetanol (exceto o caso particular da gasolina de aviação, não existe em nível de varejo a comercialização de gasolina pura no país). O desenvolvimento dessa notável infra-estrutura resultou de um esforço iniciado nos primórdios do Proálcool e foi sendo consolidada ao longo do tempo. É imperativo reconhecer que, sem a determinação política para criar tal infra-estrutura e sem o apoio das empresas de distribuição de combustíveis e da Petrobras, que durante anos se responsabilizou pela aquisição, mistura e distribuição do bioetanol puro em mistura com gasolina, a experiência brasileira com o bioetanol não teria a importância que alcançou.

Capítulo 3

Produção de bioetanol

De modo análogo à produção de bebidas alcoólicas, que é normalmente realizada por variadas maneiras, a produção de biocombustíveis com base em matérias-primas vegetais pode ser efetuada por distintas rotas tecnológicas, com diferentes vantagens e limitações. Entre esses portadores de energia solar, o bioetanol se destaca, claramente, por ser a alternativa com maior maturidade e por sua efetiva inserção nas matrizes energéticas de diversos países. Em 2006, o bioetanol representou uma oferta energética igual a cerca de 3% da demanda mundial de gasolina e mais de dez vezes superior à produção de biodiesel no mesmo período [EIA 2008].

Neste capítulo, apresenta-se a produção do bioetanol para as principais matérias-primas e tecnologias. Procura-se oferecer a cada caso uma visão panorâmica das etapas agrícola e industrial, comentando seus condicionantes e os indicadores de produtividade atuais e prospectivos. Assim, serão sucessivamente detalhados os sistemas produtivos do bioetanol de cana-de-açúcar e de milho, que respondem por grande parte da produção mundial, bem como, de um modo mais sucinto, serão abordados os sistemas produtivos do bioetanol de outras matérias-primas, como a mandioca, o trigo, a beterraba e o sorgo. Depois de caracterizadas essas rotas produtivas, apresentam-se algumas recomendações sobre os critérios a considerar na seleção das matérias-primas que podem ser adotadas para a produção de bioetanol, em que se destacam o desempenho global na utilização de recursos naturais (incluindo energia) na conversão de energia solar em biocombustível e a emissão associada de gases de efeito estufa por unidade energética disponível. Valores para esses parâmetros serão apresentados ao final do capítulo para o bioetanol de cana-de-açúcar e o bioetanol de milho.

3.1 Matérias-primas e tecnologias de produção do bioetanol

Entre os biocombustíveis líquidos, destacam-se o etanol e o biodiesel nas configurações mostradas na Tabela 6. Mediante rotas biológicas, o bioetanol pode ser produzido com base em qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares. Hoje em dia, há um leve predomínio da produção com base em materiais amiláceos (53% do total), como milho, trigo e outros cereais e grãos. Para esses casos, a tecnologia de conversão geralmente começa com a separação, a limpeza e a moagem do grão. A moagem pode ser úmida, quando o grão é embebido e fracionado antes da conversão do amido a açúcar (via úmida), ou seca, quando isso é feito durante o processo de conversão (via seca). Em ambos os casos, o amido é tipicamente convertido em açúcares por meio de um processo enzimático a altas temperaturas. Os açúcares liberados são, então, fermentados por leveduras, e o vinho resultante é destilado para a purificação do bioetanol. Além do bioetanol, esses processos envolvem, geralmente, diversos co-produtos, que variam conforme a biomassa utilizada. Na Tabela 6, incluíram-se apenas as rotas implementadas comercialmente; as demais alternativas em desenvolvimento, como mediante a hidrólise de materiais celulósicos, serão comentadas adiante.

Tabela 6 **– Quadro geral dos biocombustíveis**

Biocombustível	Matéria-prima	Redução na emissão de gases de efeito estufa	Custo de produção	Produção de biocombustível por hectare	Terras utilizadas
Bioetanol	Grãos (trigo, milho)	Moderado a baixo	Moderado	Moderado	Terras férteis
Bioetanol	Cana-de-açúcar	Alto	Baixo	Alto	Terras férteis
Biodiesel	Óleos de sementes (canola, soja etc.)	Moderado	Moderado	Baixo	Terras férteis
Biodiesel	Óleo de palma	Moderado	Moderado a baixo	Moderado	Terras litorâneas e úmidas

Fonte: Adaptado de IEA (2005).

Considerando a produção com base em açúcares, como é o caso da cana e da beterraba, o processo é mais simples e envolve uma etapa a menos, já que os açúcares estão disponíveis na biomassa. Normalmente, o processo se baseia na extração dos açúcares (por meio da moagem ou da difusão), que podem seguir diretamente para a fermentação. Após a fermen-

tação, o vinho resultante é destilado, assim como no caso da produção com base no amido. A Figura 7 sintetiza as rotas tecnológicas para produção de bioetanol, considerando as diferentes matérias-primas de interesse. Observe-se que a produção de bioetanol utilizando celulose ainda está em nível de laboratório e plantas-piloto, ainda sem significado real no contexto energético, com obstáculos tecnológicos e econômicos por superar.

Uma comparação entre as diferentes rotas para a produção de bioetanol é apresentada no Gráfico 8, que evidencia como podem ser diferentes os índices de produtividade por unidade de área cultivada. Os resultados do gráfico correspondem a lavouras em condições de boa produtividade, que em alguns casos podem implicar elevado uso de insumos, tendo sido tomados da literatura [GPC (2008)] e modificados para o caso da cana e do sorgo, em função das análises apresentadas adiante neste trabalho. As tecnologias industriais implícitas no gráfico, para conversão de açúcares e amido em bioetanol, podem ser consideradas maduras e disponíveis, exceto as referentes à hidrólise de materiais lignocelulósicos, ora em desenvolvimento, adotadas para a obtenção de bioetanol da parte celulósica da cana. Para a cana, no Gráfico 8, consideraram-se uma produção de 80 toneladas de cana por hectare, uma produtividade de 85 litros de bioetanol por tonelada de cana processada e a utilização de 30% do bagaço disponível e metade da palha, convertida em bioetanol à razão de 400 litros por tonelada de biomassa celulósica seca.

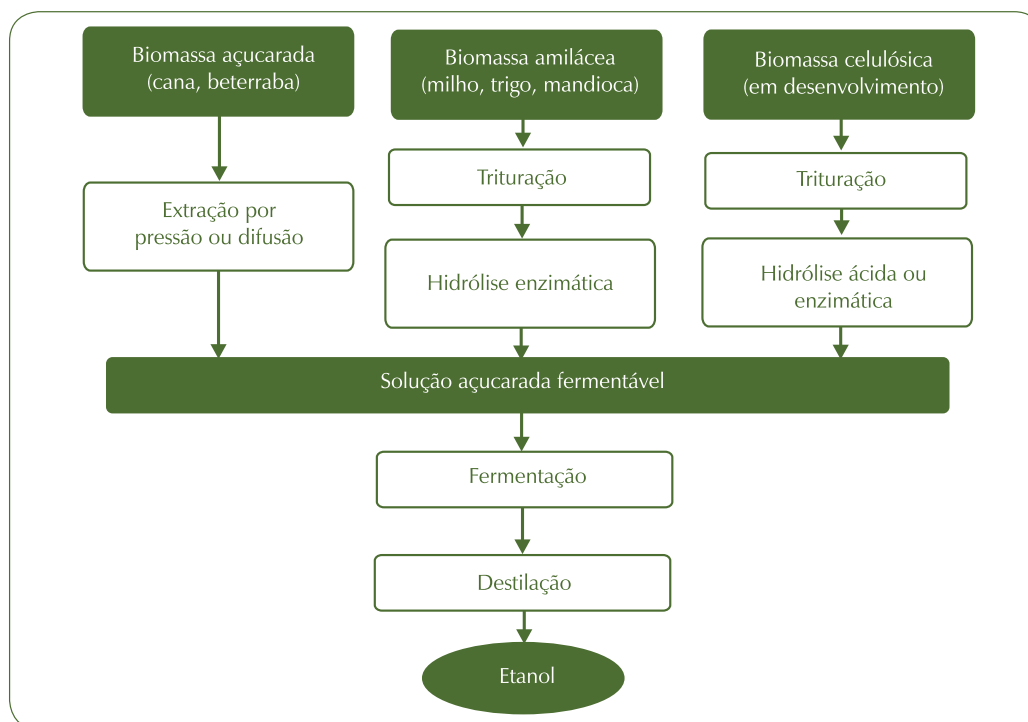
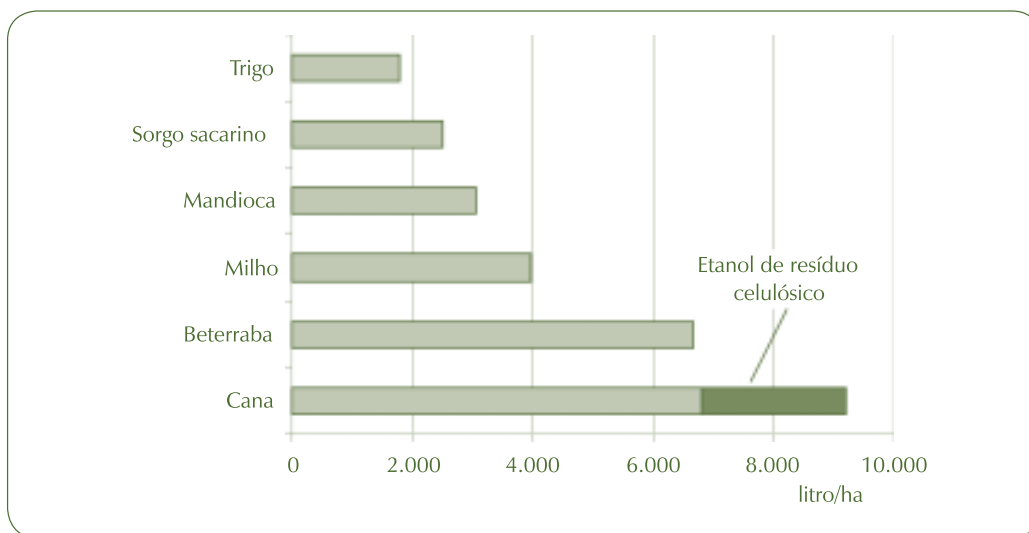
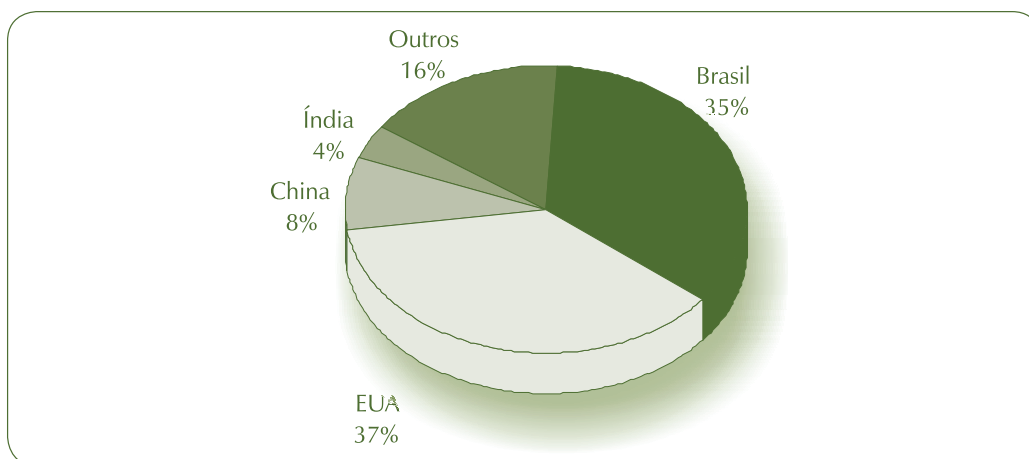
Figura 7 **– Rotas tecnológicas para produção de etanol**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

***Gráfico 8* – Produtividade média de etanol por área para diferentes culturas**

Trigo
Sorgo sacarino
Mandioca
Milho
Beterraba
Cana
Etanol de resíduo celulósico
0 2.000 4.000 6.000 8.000 10.000
litro/ha

Fonte: Modificado de GPC (2008).

Dos 51 bilhões de litros de bioetanol produzidos em 2006 [F. O. Licht (2006)], a produção norte-americana, com base no milho, e a brasileira, com base na cana, representaram 70% do total, como mostrado no Gráfico 9 [RFA (2008)]. Por conta dessa enorme importância no contexto dos biocombustíveis, serão discutidas a seguir, com um pouco mais de detalhes, as tecnologias de produção envolvendo cada uma dessas biomassas, incluindo os aspectos agrícolas mais relevantes.

***Gráfico 9* – Distribuição da produção mundial de etanol em 2006**

Fonte: Elaborado com base em RFA (2008).

3.2 Bioetanol de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene com ciclo fotossintético do tipo C4, pertencente ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, composta de espécies de gramas altas perenes, oriundas de regiões temperadas quentes a tropicais da Ásia, especialmente da Índia. A parte aérea da planta é composta pelos *colmos*, nos quais se concentra a sacarose, e pelas *pontas* e *folhas*, que constituem a palha da cana, como mostrado na Figura 8. Todos esses componentes somados totalizam cerca de 35 toneladas de matéria seca por hectare.

Um dos cultivos comerciais de maior importância em todo o mundo, a cana ocupa mais de 20 milhões de hectares, nos quais foram produzidos, aproximadamente, 1.300 milhões de toneladas em 2006/2007, com destaque para o Brasil, que, com uma área plantada de cerca de 7 milhões de hectares, respondeu por cerca de 42% do total produzido. Observe-se que o ano açucareiro, adotado internacionalmente, começa em setembro e termina em agosto do ano seguinte. O Gráfico 10 apresenta os dez principais produtores de cana na safra de 2005 [FAOSTAT (2008a)].

Figura 8 **– Estrutura típica da biomassa da cana**

Pontas
Folhas verdes
Colmos
Folhas secas

Palha = Folhas secas e verdes + pontas
Palha = 140 kg (ms)/t cana

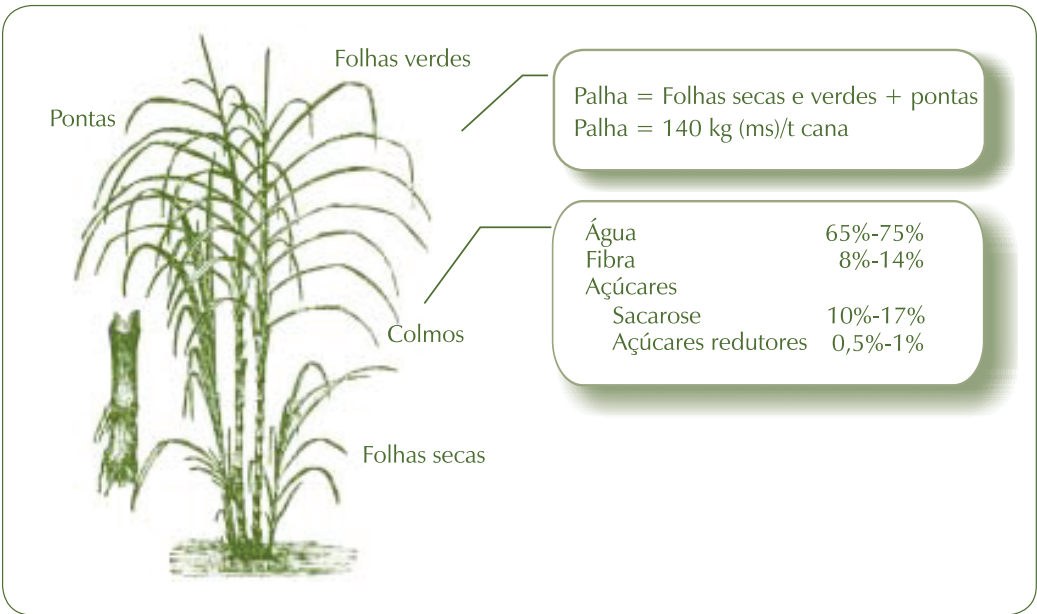
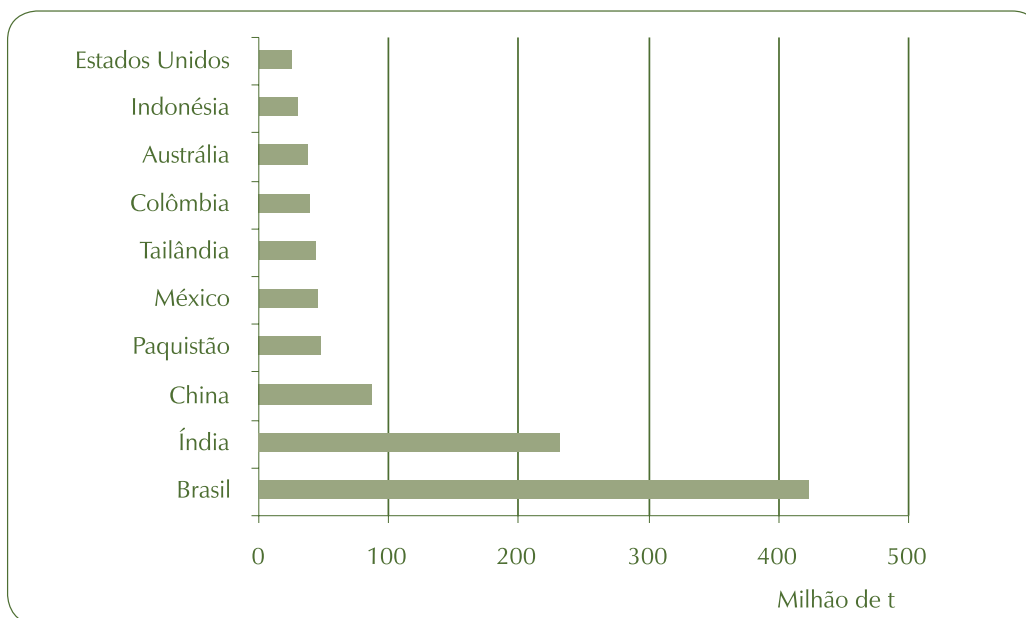
Água	65%-75%
Fibra	8%-14%
Açúcares	
Sacarose	10%-17%
Açúcares redutores	0,5%-1%

Fonte: Seabra (2008).

***Gráfico 10* – Principais países produtores de cana-de-açúcar em 2005**

Estados Unidos
Indonésia
Austrália
Colômbia
Tailândia
México
Paquistão
China
Índia
Brasil

0 100 200 300 400 500

Milhão de t

Fonte: FAO (2007).

O clima ideal para o cultivo da cana é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e úmida, para proporcionar a germinação, o perfilhamento (formação de brotos) e o desenvolvimento vegetativo, seguida de outra fria e seca, para promover a maturação e o acúmulo de sacarose nos colmos. A cana não apresenta boa produtividade em climas como o das regiões equatoriais úmidas, por isso faz pouco sentido imaginar que a Amazônia se preste a cultivos comerciais extensivos dessa planta.

O ciclo completo da cana-de-açúcar é variável, dependendo do clima local, de variedades e práticas culturais. No Brasil, o ciclo é, geralmente, de seis anos, dentro do qual ocorrem cinco cortes, quatro tratos de soqueiras e uma reforma, como se explica a seguir. De forma geral, o primeiro corte é feito 12 ou 18 meses após o plantio (dependendo da cana utilizada), quando se colhe a chamada cana-planta. Os demais cortes, quando se colhe a cana-soca resultante da rebrota, são feitos uma vez por ano, ao longo dos quatro anos consecutivos, com redução gradual da produtividade, até que se torne economicamente mais interessante reformar o canavial do que efetuar um novo corte. Substitui-se, então, a cana antiga por um novo plantio e inicia-se um novo ciclo produtivo. Nessa reforma do canavial, a área cultivada fica alguns meses em descanso e pode receber outros cultivos de ciclo curto, como leguminosas.

De acordo com o ciclo produtivo da cana, para buscar uma produção mais ou menos estável nas diversas safras e a racionalização do uso dos recursos na etapa agrícola (maquinário e

mão-de-obra), as áreas de produção devem estar subdivididas em talhões em diferentes etapas do ciclo, correspondendo, para um ciclo de seis anos, a cerca de um sexto da área total para cada etapa. Outra conseqüência importante desse ciclo produtivo é que, na implantação de uma unidade de produção de bioetanol de cana, as atividades agrícolas devem ser iniciadas dois a três anos antes da efetiva produção industrial, inicialmente para multiplicar as mudas e alcançar, depois de iniciada a moagem, uma produção mais ou menos estável de matéria-prima dentro de três a quatro anos. Visando reduzir custos e preservar a fertilidade do solo, vêm sendo desenvolvidas técnicas como o cultivo direto e o emprego de Estruturas de Tráfego Controlado (ETCs) para as operações agrícolas, o que permite ampliar o número de cortes ao manter a produtividade em níveis elevados [CGEE (2007b)].

É interessante observar que, como o ciclo produtivo típico da cana apresenta cinco cortes ao longo de seis anos, a produtividade média em base anual deve levar em conta também o período de reforma do canavial. Além disso, como uma parte da cana produzida (cerca de 8%) é destinada à reforma (replantio) dos canaviais, a produtividade anual medida em toneladas de cana efetivamente processadas por hectare plantado é inferior à produtividade total avaliada em termos de cana colhida.

Em média, a produtividade anual, bastante influenciada pela variabilidade climática e pela região produtora, está entre 50 t/ha e 100 t/ha (peso do colmo úmido), ficando a média brasileira em torno de 70 t/ha plantado, um valor comparável às melhores regiões produtoras em outros países. Embora existam registros de produtividade de cana alcançando até 200 t/ha [Janick (2007)], na Região Centro-Sul do Brasil, onde se localiza a maior parte das usinas brasileiras, esses índices estão entre 78 t/ha e 80 t/ha, enquanto no Estado de São Paulo, principal produtor, situam-se na faixa de 80 t/ha a 85 t/ha, ambos os casos considerando ciclo de cinco cortes [Unica (2008)]. No Anexo 2, apresentam-se valores da produtividade média da cana no Brasil, em toneladas por hectare colhido.

Uma visão dos principais parâmetros da cultura da cana-de-açúcar nas condições praticadas no Centro-Sul brasileiro é apresentada na Tabela 7. Nessa tabela, os valores de pol e fibra, dados como percentagem em massa da cana, correspondem, respectivamente, ao teor de sacarose aparente e de bagaço disponíveis na cana. Além da sacarose, dependendo de sua maturação, a cana contém cerca de 0,5% de outros açúcares (como glucose e frutose), sem interesse para produção de açúcar sólido, mas passíveis de uso para fabricação de bioetanol [Fernandes (2003)].

Como se pode observar na Tabela 7, a demanda de fertilizantes para o cultivo da cana é reduzida quando comparada ao uso em outras culturas, em grande parte por conta dos resíduos industriais que são retornados para o campo. O uso de nitrogênio sintético é baixo, e nas áreas onde a vinhaça é aplicada, todo o potássio é provido pela fertirrigação. Apesar de ser uma cultura com alta demanda de água, índices pluviométricos superiores a 800 mm (ideal, entre 1.200 mm e 1.500 mm) e adequadamente distribuídos (períodos chuvoso e seco bem definidos) são suficientes para alcançar uma boa produtividade. Em unidades produtoras

típicas no Centro-Sul brasileiro (utilizando metade da cana para açúcar e metade para bioetanol), a aplicação da vinhaça representa cerca de 15 mm a 20 mm em 30% do canavial e praticamente elimina a necessidade da irrigação. Os valores apresentados para aplicação da vinhaça e torta de filtro se referem aos valores recomendados em condições típicas para o Estado de São Paulo, de acordo com a legislação ambiental.

(a) (b)

Colheita da cana: (a) manual com queima e (b) mecanizada sem queima.

O período da colheita da cana varia de acordo com o regime de chuvas, de modo a tornar possíveis as operações de corte e transporte e para permitir alcançar o melhor ponto de maturação e acumulação de açúcares. Na Região Centro-Sul do Brasil, a colheita é de abril a dezembro, enquanto, na Região Nordeste, é realizada de agosto a abril. O sistema tradicional de colheita, ainda utilizado em cerca de 70% das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil, envolve a queima prévia do canavial e o corte manual da cana inteira. Esse procedimento, no entanto, vem sendo aos poucos substituído pela colheita mecanizada da cana crua picada (sem queima), por conta das restrições ambientais às práticas da queima. Com os recentes acordos firmados entre governo e produtores, espera-se que até 2020 toda a cana seja colhida mecanicamente, sem a queima prévia do canavial.

Tabela 7 **– Principais parâmetros agrícolas da cana no Centro-Sul brasileiro**

Indicador	Valor
Produtividade	87,1 tc/ha
Colheita de cana crua (sem queimar)	30,8%
Colheita mecanizada	49,5%
Pol % cana (teor de sacarose)	14,22
Fibra % cana (teor de bagaço)	12,73
Fertilizantes	
P_2O_5	
Cana-planta	120 kg/ha
Cana-soca sem vinhaça	25 kg/ha
K_2O	
Cana-planta	120 kg/ha
Cana-soca sem vinhaça	115 kg/ha
Nitrogênio	
Cana-planta	50 kg/ha
Cana-soca com vinhaça	75 kg/ha
Cana-soca sem vinhaça	90 kg/ha
Calcário	1,9 t/ha (apenas no plantio)
Herbicida	2,20 kg/ha (valor recomendado)
Inseticida	0,12 kg/ha (valor recomendado)
Outros defensivos	0,04 kg/ha
Aplicação de torta de filtro	5 t (base seca)/ha
Aplicação de vinhaça	140 m^3/ha

Fonte: Macedo (2005a) e CTC (2005).

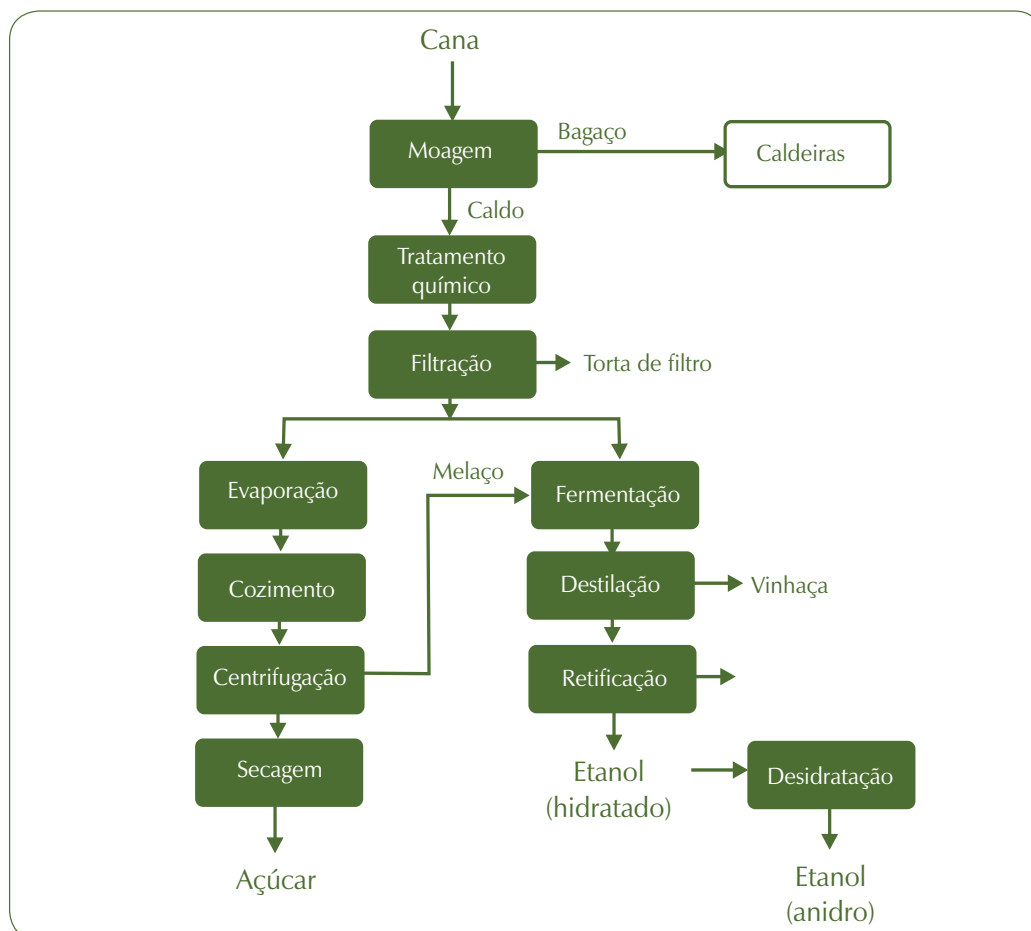
Figura 9 – **Distribuição das 350 usinas de processamento de cana-de-açúcar no Brasil**

Fonte: CGEE (2006).

Após o corte, a cana é transportada o mais cedo possível para a usina, a fim de evitar perdas de sacarose. Exceto por poucas empresas que utilizam algum transporte fluvial, o sistema de transporte é baseado em caminhões, com diversas possibilidades – caminhão simples, duplo (Romeu-Julieta), treminhão, rodotrem –, cuja capacidade de carga varia de 15 a 60 toneladas. Vale mencionar que, nos últimos anos, a logística da cana, envolvendo as operações integradas de corte, carregamento e transporte, vem passando por uma contínua evolução, com a finalidade de reduzir os custos e diminuir o nível de compactação do solo.

Transporte de cana-de-açúcar com treminhão no Brasil.

A cana não pode ser armazenada por mais do que poucos dias e, independentemente do tipo de instalação, as usinas só operam durante o período de safra, sendo as etapas iniciais do processamento para bioetanol basicamente as mesmas empregadas para a produção de açúcar, como mostrado na Figura 10. Uma vez na usina, a cana, em geral, é lavada (somente a cana inteira) e segue para o sistema de preparo e extração, que no Brasil é baseado em moendas, isto é, a extração do caldo se realiza sob pressão de rolos, montados em conjuntos com quatro a sete sucessivos ternos de moenda. No conjunto de rolos da moenda, o caldo, que contém a sacarose, é separado da fibra (bagaço), que segue para a planta de energia da usina, na qual é usada como combustível. Em algumas novas unidades implantadas no Brasil, tem sido adotada a extração por difusão, com expectativas de vantagens do ponto de vista energético. Nos difusores, a cana picada e desfibrada passa por sucessivas lavagens com água quente, cedendo por lixiviação seus açúcares, e, ao final, passa por um rolo de secagem, de onde sai o bagaço a ser utilizado nas caldeiras. Produzido na moenda ou no difusor, o caldo contendo os açúcares da cana pode, então, ser destinado à produção de açúcar ou bioetanol.

***Figura 10* – Diagrama de fluxo da produção de açúcar e bioetanol de cana**

Fonte: Seabra (2008).

Para a produção de açúcar, o caldo é inicialmente peneirado e tratado quimicamente, para coagulação, floculação e precipitação das impurezas, que são eliminadas por decantação. A torta de filtro, utilizada como adubo, resulta da recuperação de açúcar do lodo do decantador através de filtros rotativos a vácuo. O caldo tratado é, então, concentrado em evaporadores de múltiplo efeito e cozedores para cristalização da sacarose. Nesse processo, nem toda a sacarose disponível na cana é cristalizada e a solução residual rica em açúcar (mel) pode retornar mais de uma vez ao processo com o propósito de recuperar mais açúcar. O mel final, também chamado de melaço e que não retorna ao processo de fabricação de açúcar, contém ainda alguma sacarose e um elevado teor de açúcares redutores (como glicose e frutose, resultantes da decomposição da sacarose), podendo ser utilizado como matéria-prima para a produção do bioetanol mediante fermentação.

Desse modo, a produção de bioetanol de cana-de-açúcar pode se basear na fermentação tanto do caldo da cana direto quanto de misturas de caldo e melaço, como é mais freqüentemente praticada no Brasil. No caso de bioetanol de caldo direto, as primeiras etapas do processo de fabricação, da recepção da cana ao tratamento inicial do caldo, são semelhantes ao processo de fabricação do açúcar. Em um tratamento mais completo, o caldo passa pela calagem, aquecimento e decantação, assim como no processo do açúcar. Uma vez tratado, o caldo é evaporado para ajustar sua concentração de açúcares e, eventualmente, é misturado com o melaço, dando origem ao mosto, uma solução açucarada e pronta para ser fermentada.

O mosto segue para as dornas de fermentação, onde é adicionado com leveduras (fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisae*) e fermentado por um período de 8 a 12 horas, dando origem ao vinho (mosto fermentado, com uma concentração de 7% a 10% de álcool). O processo de fermentação mais utilizado nas destilarias do Brasil é o Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação das leveduras do vinho mediante sua centrifugação. Assim, após a fermentação, as leveduras são recuperadas e tratadas para novo uso, enquanto o vinho é enviado para as colunas de destilação.

Usina de processamento de cana-de-açúcar no Brasil.

Na destilação, o bioetanol é recuperado inicialmente na forma hidratada, com aproximadamente 96° GL (porcentagem em volume), correspondentes a cerca de 6% de água em peso, deixando a vinhaça ou vinhoto como resíduo, normalmente numa proporção de 10 a 13 litros por litro de bioetanol hidratado produzido. Nesse processo, outras frações líquidas também são separadas, dando origem aos álcoois de segunda e ao óleo fúsel. O bioetanol hidratado pode ser estocado como produto final ou pode ser enviado para a coluna de desidratação. Mas, como se trata de uma mistura azeotrópica, seus componentes não podem ser separados por uma simples destilação. A tecnologia mais utilizada no Brasil é a desidratação pela adição do cicloexano, formando uma mistura azeotrópica ternária, com ponto de

ebulição inferior ao do bioetanol anidro. Na coluna de desidratação, o cicloexano é adicionado no topo, e o bioetanol anidro é retirado no fundo, com aproximadamente 99,7° GL ou 0,4% de água em peso. A mistura ternária retirada do topo é condensada e decantada, enquanto a parte rica em água é enviada à coluna de recuperação de cicloexano.

A desidratação do bioetanol ainda pode ser feita por adsorção com peneiras moleculares ou pela destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG), que se destacam pelo menor consumo de energia e também pelos custos mais elevados. Por conta das crescentes exigências do mercado externo, diversos produtores de bioetanol no Brasil e em outros países estão optando pelas peneiras moleculares, já que são capazes de produzir um bioetanol anidro livre de contaminantes.

A possibilidade de utilizar os açúcares da cana total ou parcialmente para produção de bioetanol se configura como uma importante flexibilidade para essa agroindústria, que, em função das condições de preço, demanda existente e perspectivas de mercado, pode arbitrar, dentro de limites, um programa de produção de mínimo custo e máximo benefício econômico. Exatamente para aproveitar essa vantagem, diversas usinas brasileiras têm linhas de fabricação de açúcar e bioetanol capazes, cada uma, de processar cerca de 75% do caldo produzido, permitindo uma margem de 50% de capacidade total de processo frente à capacidade de extração das moendas.

O uso de água no processo é relativamente alto. Atualmente, nas condições do Centro-Sul brasileiro, a captação está em torno de 1,8 m^3 por tonelada de cana processada, mas vem se reduzindo de modo significativo como resultado da implantação de medidas de reuso, que permitem reduzir tanto o nível de captação quanto a disposição de água tratada. Esse aspecto será mais bem analisado no Capítulo 6.

Considerando todo o processo de produção de bioetanol de cana, os resíduos consistem na vinhaça (entre 800 a 1.000 litros por tonelada de cana processada para bioetanol), na torta de filtro (aproximadamente 40 kg úmidos por tonelada de cana processada) e nas cinzas das caldeiras [Elia Neto (2007)]. Como comentado, nas plantas brasileiras, tais resíduos são valorizados e efetivamente constituem subprodutos, que são reciclados e utilizados como fertilizantes, contribuindo para reduzir, de modo significativo, a necessidade de incorporar fertilizantes minerais e evitar a demanda por irrigação nos canaviais.

Como a produção do bioetanol envolve uma grande eliminação de água, a demanda de energia é alta, especialmente com respeito à parcela de energia térmica, como mostrado na Tabela 8, elaborada com base em Pizaia (1998). Nessa tabela, a demanda de vapor para o bioetanol hidratado e anidro considerou, respectivamente, a tecnologia convencional com consumo de 3,0 kg a 3,5 kg de vapor por litro de bioetanol hidratado e um processo de destilação azeotrópica com cicloexano, com consumo de 1,5 kg a 2,0 kg de vapor por litro de bioetanol anidro. Com relação à demanda de energia elétrica, há uma pequena variação

entre os processos, mas todos eles estão próximos do valor apresentado de 12 kWh por tonelada de cana processada.

Tabela 8 – **Demanda de energia no processamento da cana**

Energia	Unidade	Açúcar	Bioetanol hidratado	Bioetanol anidro
Térmica Como vapor saturado a 1,5 bar (manométrico), para aquecedores, evaporadores e destilaria	kg/tc	470-500	370-410	500-580
Mecânica Acionamento dos sistemas de preparo e moagem da cana e motobombas	kWh/tc	16	16	16
Elétrica Motores elétricos diversos, iluminação e outras cargas	kWh/tc	12	12	12

Fonte: Pizaia (1998).

No caso da agroindústria de bioetanol com base na cana, a totalidade da energia consumida no processo pode ser provida por um sistema de produção combinada de calor e potência (sistema de co-geração) instalado na própria usina, utilizando apenas bagaço como fonte de energia. Com efeito, a maioria das usinas de açúcar de cana em todo o mundo produzem grande parte da energia de que necessitam. No Brasil, particularmente, as usinas são auto-suficientes e, com freqüência, ainda conseguem exportar excedentes cada vez mais relevantes de energia elétrica para a rede pública, graças à crescente utilização de equipamentos de melhor desempenho. Mais detalhes sobre a configuração da planta de energia das usinas e seus potenciais de geração são discutidos adiante, no Capítulo 4.

Quanto aos rendimentos industriais, pode-se dizer que, em geral, uma tonelada de cana utilizada exclusivamente para a produção de açúcar dá origem a cerca de 100 kg de açúcar, além de se poder produzir mais de 20 litros de bioetanol por meio do melaço. Mais especificamente para o contexto brasileiro, considerando os valores médios observados em cerca de 60 usinas do Estado de São Paulo (valores adaptados de CTC, 2005), obtêm-se os dados apresentados na Tabela 9, com as perdas referidas a uma cana média com teor de sacarose de 14%. Com base nesses valores de rendimento, no caso do uso exclusivo para a produção de bioetanol, com uma tonelada de cana é possível obter 86 litros de bioetanol hidratado, ao passo que, quando o objetivo é a produção de açúcar, além de 100 kg desse produto, ainda é possível produzir 23 litros de bioetanol hidratado por tonelada de cana por meio do melaço. Esses últimos valores correspondem a um processo de produção de açúcar com duas massas

(processos sucessivos de cristalização), no qual o mel não é esgotado, sendo enviado relativamente rico em sacarose para a produção de bioetanol, o que permite melhorar a qualidade do produto e reduzir o consumo de energia na produção de açúcar. Em síntese, as sinergias e complementaridades possíveis entre a produção de açúcar e bioetanol ajudam na redução de custos e no incremento da eficiência dos processos agroindustriais.

***Tabela 9* – Perdas e rendimentos médios das usinas de cana**

Item	Perda de açúcar ou rendimento
Lavagem da cana	0,7%
Extração	3,9%
Torta de filtro	0,5%
Indeterminada	3,5%
Destilação	0,2%
Rendimento fermentativo	90,0%
Rendimento global	
Açúcar	100 kg/t cana (+ 23 litros/t cana)
Bioetanol hidratado	86 litros/t cana

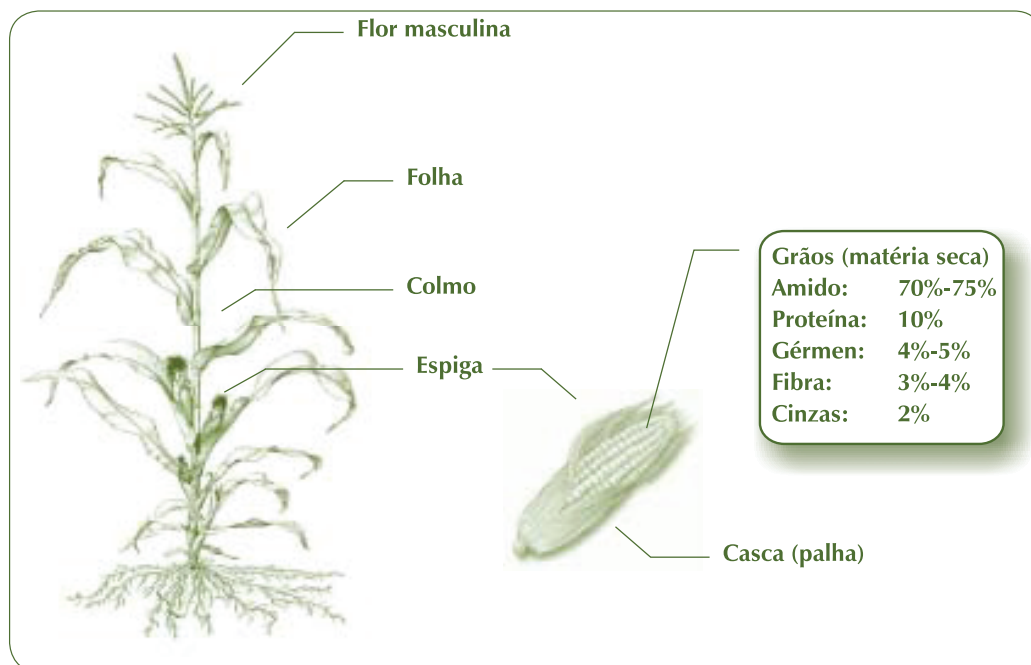
Fonte: Valores adaptados de CTC (2005).

3.3 Bioetanol de milho

Assim como a cana, o milho (*Zea mays spp.*) é uma planta C4 da família das gramíneas, com ciclo produtivo anual. Originário do México, o milho é cultivado atualmente em todos os continentes e ocupa, aproximadamente, 147 milhões de hectares, nos quais foram produzidos cerca de 725 milhões de toneladas em 2004 [FAOSTAT (2008a)], constituindo um importante componente da oferta de alimentos em vários países, como alimento humano e animal.

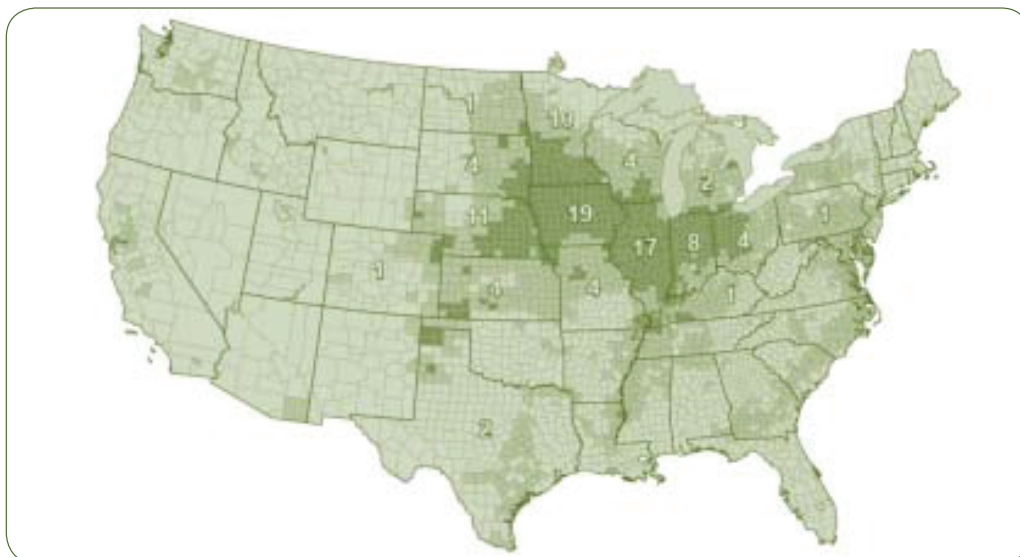
Figura 11 – **Estrutura típica da biomassa do milho**

Flor masculina
Folha
Colmo
Espiga
Casca (palha)

Grãos (matéria seca)	
Amido:	70%-75%
Proteína:	10%
Gérmen:	4%-5%
Fibra:	3%-4%
Cinzas:	2%

Fonte: Seabra (2008).

Considerando a produção de bioetanol, interessa comentar o contexto norte-americano, no qual o milho é a matéria-prima responsável por 98% da produção desse biocombustível. Os Estados Unidos lideram a produção de milho em todo o mundo e respondem por quase metade do volume produzido. Em 2006, a produção americana foi superior a 267 milhões de toneladas de grãos, para uma área colhida de pouco mais de 28 milhões de hectares [USDA (2008)]. Do total produzido, mais de 50% foi destinado à alimentação animal, enquanto a indústria de bioetanol consumiu menos de 20% da produção [Iowa Corn (2008)]. Dentro dos Estados Unidos, a produção se concentra na região chamada de Cinturão do Milho, com destaque especial para os estados de Iowa e Illinois, como pode ser observado na Figura 12.

Por ser uma planta intolerante ao frio, nas zonas temperadas, o milho é plantado na primavera, equivalente aos meses de abril e maio no hemisfério norte. Normalmente, o cultivo envolve uma rotação de cultura com alguma planta fixadora de nitrogênio, geralmente alfafa ou soja (nas regiões com verões mais longos), e eventualmente uma terceira cultura pode ser utilizada, como trigo. No modelo tradicional, a terra é arada todos os anos, mas o uso do cultivo mínimo está se tornando uma prática cada vez mais comum. A colheita se estende nos meses de setembro a novembro (outono nos Estados Unidos), sendo realizada por uma colheitadeira mecânica. Na via mecanizada, a espiga é separada do colmo e os grãos são extraídos da espiga, deixando a palha e o sabugo já no campo.

Figura 12* – Distribuição da produção de milho nos Estados Unidos

Fonte: Seabra (2008).
* Os números no mapa indicam a contribuição percentual de cada estado.

Colheita do milho.

A produtividade média americana está em torno de 9 toneladas de grãos por hectare [USDA (2008)]. Na realidade, os grãos representam cerca de 50% da matéria seca da planta, que ainda conta com o colmo, as folhas, a palha e o sabugo [Pordesimo et al. (2004)], totalizando

cerca de 15 toneladas de matéria seca por hectare. Embora se espere que essa biomassa venha a ser utilizada como alternativa energética, é imprescindível que uma boa parte dela seja mantida no campo após a colheita, a fim de preservar a fertilidade do solo [Blanco-Canqui e Lal (2007)].

Comparado com a cana, o milho demanda uma quantidade significativamente maior de fertilizantes, conforme mostrado na Tabela 10, com resultados ponderados para as áreas com e sem irrigação [Pimentel e Patzek (2005)]. Com relação à água, a demanda total é de cerca de 5,6 mil m^3 por hectare, embora menos de 10% da área plantada nos Estados Unidos precise de irrigação [NGCA (2008)].

Tabela 10 **– Demanda de fertilizantes e defensivos para a produção de milho nos EUA**

Insumo	Demanda
Nitrogênio	153 kg/ha
Fósforo	65 kg/ha
Potássio	77 kg/ha
Calcário	1.120 kg/ha
Sementes	21 kg/ha
Irrigação (em 10% da área plantada)	8,1 cm/ha
Herbicida	6,2 kg/ha
Inseticida	2,8 kg/ha

Fonte: Pimentel e Patzek (2005).

O bioetanol pode ser produzido de milho por meio de dois processos, adotando moagem úmida ou seca. A via úmida era a opção mais comum até os anos 1990, mas, hoje em dia, a via seca se consolidou como o processo mais utilizado para a produção do bioetanol. Apesar de não proporcionar grande variedade de produtos, como no caso úmido, as inúmeras otimizações realizadas no processo seco tornaram-no uma opção com custos de investimento e operacionais mais baixos, reduzindo consideravelmente o custo final do bioetanol [Novozymes (2002)].

No processo úmido, apresentado na Figura 13, as diferentes frações do grão do milho são separadas, possibilitando a recuperação de diversos produtos, como proteínas, nutrientes, gás carbônico (CO_2, utilizado em fábricas de refrigerantes), amido e óleo de milho. Enquanto o óleo de milho é o produto mais valioso, o amido (e, por conseguinte, o bioetanol) é aquele produzido em maior volume, com rendimentos ao redor de 440 litros de bioetanol por tonelada seca de milho, como mostrado na Tabela 11.

Já no caso da via seca, o único co-produto do bioetanol é um suplemento protéico para alimentação animal conhecido como DDGS (*distillers dried grains with solubles*). Nesse processo, esquematizado na Figura 14, o grão de milho moído é adicionado de água e enzimas

(alfa-amilase), a fim de promover a hidrólise do amido em cadeias menores de açúcar. Na etapa seguinte, essas cadeias são sacarificadas pela ação da glico-amilase e a solução resultante segue para a fermentação. Em algumas unidades, essas operações de liquefação/sacarificação sofrem o reciclo de uma parte da vinhaça fina (processo de *backsetting*) com o intuito de reduzir o pH e prover nutrientes para a fermentação.

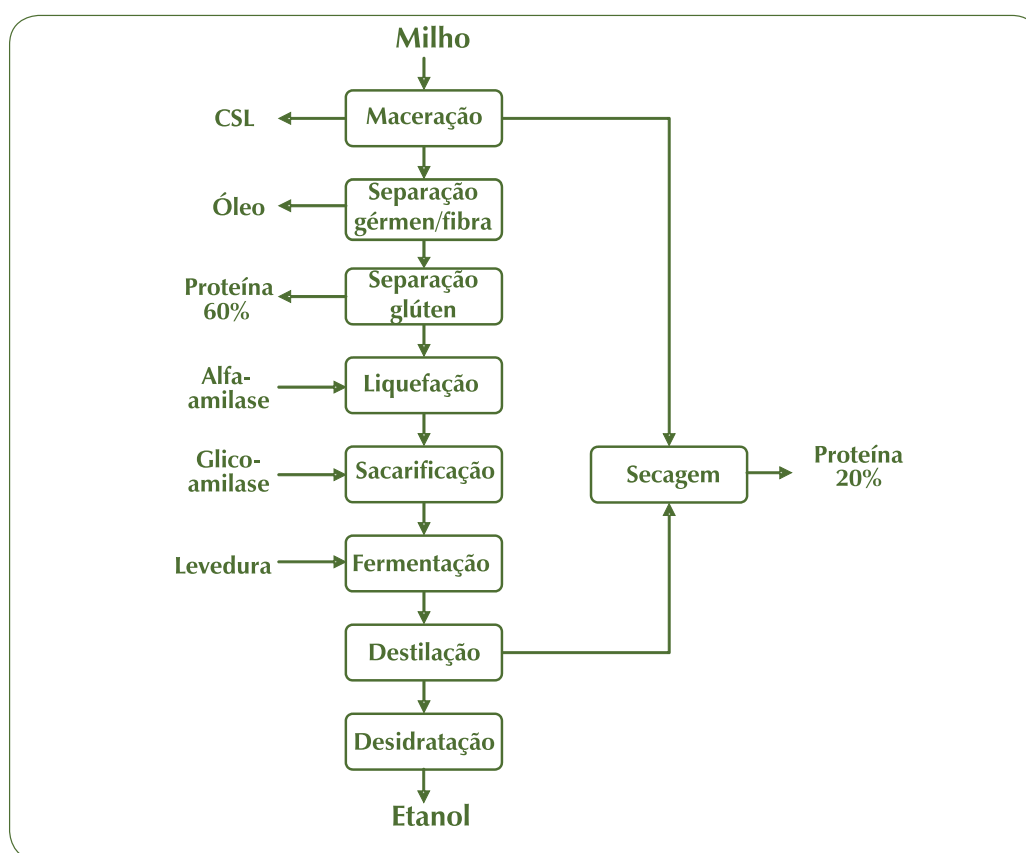
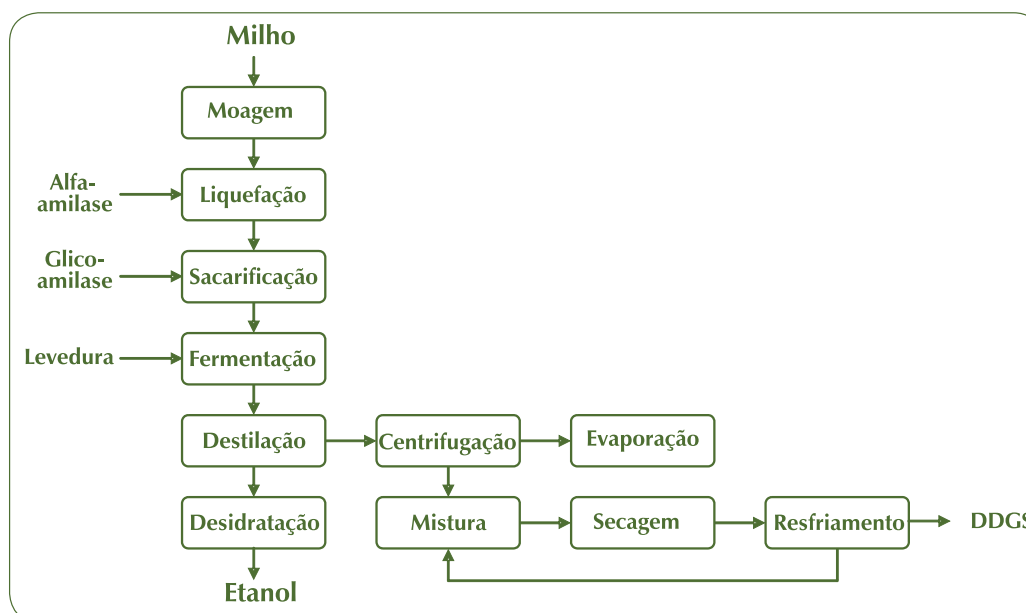
Figura 13 – Diagrama de fluxo do processo via úmida para a produção de bioetanol de milho

Fonte: Wyman (1996).

Tabela 11 – Rendimentos dos co-produtos na via úmida

Produto	Rendimento
Óleo de milho	34–38 kg/t milho
Proteína 20%	306 kg/t milho
Proteína 60%	68 kg/t milho
CO_2	308 kg/t milho
Bioetanol	440 litros/t milho

Fonte: Wyman (1996).

Figura 14 – Diagrama de fluxo do processo via seca para a produção de bioetanol de milho

Fonte: Wyman (1996).

Apesar de desenvolver-se rapidamente no início, o processo de liberação de açúcares reduz sua velocidade em pouco tempo, o que pode exigir tempos de residência nos reatores de 48 a 72 horas para alcançar a máxima sacarificação do amido. Para reduzir esse tempo de residência e o risco de contaminação, muitas unidades desenvolvem a sacarificação e a fermentação de modo simultâneo. Nesse caso, a conversão à glicose também é diminuída, mas, para os processos que utilizam o *backsetting*, os açúcares não convertidos ganham com o reciclo mais uma oportunidade de serem aproveitados.

Como no caso do bioetanol de cana, na fermentação, a glicose é transformada em bioetanol pela ação da levedura *Saccharomyces cerevisiae* e o vinho produzido segue para a desti-

lação. A vinhaça produzida nessa etapa segue para um conjunto de centrífugas, no qual é separada a vinhaça fina, que pode ser recirculada no processo. A parte restante da vinhaça é normalmente concentrada em evaporadores, produzindo um xarope com cerca de 50% de umidade. Esse xarope é combinado com os sólidos retirados na centrífuga e secado até aproximadamente 10% de umidade, dando origem ao DDGS mencionado anteriormente. As demais etapas da destilação são equivalentes ao processo utilizado para o bioetanol de cana no Brasil, com a diferença de que, nos EUA, a desidratação com peneira molecular já é o processo mais utilizado para a produção do bioetanol anidro. Quanto aos rendimentos, são obtidos por tonelada seca de milho cerca de 460 litros de bioetanol anidro e 380 kg de DDGS [Wyman (1996)].

Planta de produção de bioetanol de milho nos EUA.

3.4 Bioetanol de outras matérias-primas

Como comentado no início deste capítulo, qualquer matéria-prima com suficiente teor de açúcar ou amido pode ser convertida em bioetanol. Nesse sentido, em alguns países utilizam-se

cultivos como mandioca, trigo e beterraba açucareira, assim como são freqüentemente mencionadas as possibilidades do sorgo sacarino. Essas alternativas serão comentadas a seguir.

A mandioca (*Manihot esculenta*) é uma planta originária do Brasil e bastante cultivada em regiões tropicais da África e da Ásia. Além de sua ampla utilização como alimento básico na dieta humana e animal, na Tailândia e na China a mandioca é semi-industrializada para exportação (como tapioca) e utilizada localmente para produzir bioetanol para bebidas. Como principais vantagens, apresenta um elevado conteúdo de amido de suas raízes, entre 20% e 30%, associado à rusticidade dos cultivos, à baixa exigência edafoclimática e à possibilidade de produzir ao longo de quase todo o ano. Essas características motivaram tentativas concretas para o uso de mandioca durante a primeira fase do Proálcool, o programa brasileiro de bioetanol, nos anos 1970. Entretanto, tais projetos não tiveram êxito, principalmente por causa do preço elevado do bioetanol de mandioca frente ao bioetanol de cana-de-açúcar e das descontinuidades no fornecimento regular de raízes para a indústria. Nos últimos anos, principalmente em países asiáticos, a mandioca tem sido proposta para produção de bioetanol combustível [Howeler (2003)] e tem sido efetivamente empregada em destilarias na Tailândia [Koisumi (2008)].

Para a produção de bioetanol, as raízes de mandioca são descascadas, lavadas e moídas, passando então a cozedores e, sucessivamente, aos tanques para sacarificação do amido, em processos similares aos empregados para o bioetanol de milho. Com índices de produtividade industrial semelhantes aos adotados para o milho, uma tonelada de mandioca *in natura*, com cerca de 25% de amido, permite produzir 170 litros de bioetanol. Nessas condições, considerando a produtividade agrícola média encontrada em plantações bem cuidadas no Brasil, em torno de 18 toneladas por hectare [Mandioca Brasileira (2008)], resultaria uma produtividade agroindustrial de 3.060 litros de bioetanol por hectare. Além da vinhaça, efluente do processo de destilação, não se identificaram co-produtos de valor significativo nesse processo [Trindade (1985)]. Apesar de seu custo mais elevado que o da mandioca, a batata-doce também poderia ser processada de forma similar e tem sido avaliada como matéria-prima para a fabricação de bioetanol, com resultados limitados.

O trigo (*Triticum spp.*), outro cultivo fornecedor de amido, tem sido empregado, nos últimos anos, para a produção de bioetanol em alguns países europeus, como Inglaterra e Alemanha, mediante um processo industrial bastante similar ao utilizado para o milho. Nesse caso, a produtividade agrícola e a produtividade industrial típicas são, respectivamente, 7,5 toneladas por hectare e 240 litros de bioetanol por tonelada de grãos processados [LowCVP (2004)], resultando numa produção de 1.800 litros por hectare cultivado. Também como o milho, são produzidos cerca de 320 kg de co-produtos com valor para a alimentação animal por tonelada de trigo processado. Bastante parecidas com o trigo, as culturas da cevada e do centeio também têm sido adotadas, em pequena escala, para a produção de bioetanol combustível em países da Europa.

Entre os cultivos que produzem diretamente açúcar, além da cana, a beterraba açucareira (*Beta vulgaris*) tem sido utilizada para a fabricação de bioetanol, utilizando o mel residual

(melaço) sempre disponível na produção industrial de sacarose [Tereos (2006)]. Essa hortaliça tem uma raiz tuberosa, na qual acumula quantidades elevadas de açúcar, apresentando produtividade entre 50 e 100 toneladas por hectare e teores de sacarose da ordem de 18% [RIRDC (2007)], podendo alcançar índices de produtividade agroindustriais bastante elevados, da ordem de 7.500 litros de bioetanol por hectare cultivado, similares à cana. O processamento industrial da beterraba se inicia com sua limpeza e fracionamento em fatias finas, que seguem para um difusor, no qual são, sucessivamente, lavadas em água quente, cedendo seu açúcar. O líquido resultante dessa operação contém aproximadamente 16% de sólidos solúveis extraídos da beterraba, sendo então processado de forma análoga ao caldo de cana, para açúcar ou para bioetanol. Com uma tonelada de tubérculos, são produzidos 86 litros de bioetanol e 51 kg de uma torta fibrosa que pode ser utilizada para alimentação animal [El Sayed et al. (2005)]. Observe-se que, apesar de apresentar elevada produtividade, a beterraba depende de energia externa (eletricidade e combustível) para seu processamento.

Embora ainda não exista uma produção significativa de bioetanol com base no sorgo sacarino (*Sorghum bicolor (L.) Moench*), esse cultivo tem sido freqüentemente proposto como uma potencial fonte de matéria-prima. Em particular, a utilização do sorgo para a fabricação de bioetanol poderia ser integrada à agroindústria canavieira, estendendo o período usual de safra com um cultivo mais rústico que a cana e com diversas semelhanças quanto ao processamento. Os colmos de sorgo doce podem ser processados em moendas, produzindo um caldo açucarado, com um conteúdo de sacarose inferior ao caldo de cana, que pode, por sua vez, ser submetido a um processo industrial similar para produzir méis e bioetanol.

Considerando uma produtividade industrial de 40 litros de bioetanol por tonelada de sorgo processado [Icrisat (2004)] e os valores de produtividade agrícola de 50 toneladas por hectare, observados em áreas plantadas com o cultivar BR 505, desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), no Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, visando à produção de bioetanol [Teixeira et al. (1997)], tem-se uma produtividade agroindustrial de 2.500 litros de bioetanol por hectare. Não obstante, o emprego do sorgo ainda apresenta dificuldades que precisam ser superadas antes de sua efetiva adoção, principalmente sua reduzida resistência à degradação após a colheita, a limitada base de germoplasma, a pouca adaptabilidade ambiental e a baixa resistência a pragas e doenças [Venturi e Venturi (2003)]. Com efeito, experimentos em usinas paulistas com sorgo, mesmo consorciado à cana, não produziram resultados motivadores [Leal (2008)].

Tendo em vista a possível viabilização, em médio prazo, de rotas inovadoras para a produção de bioetanol, especialmente mediante a hidrólise de materiais celulósicos, além das espécies silviculturais como o eucalipto e algumas leguminosas arbóreas (em particular, *Leucaena spp*.), cresce o interesse em gramíneas de rápido crescimento e alta produtividade, como o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), normalmente utilizado como forrageira no Brasil, e o *switchgrass* (*Panicum virgatum*), espécie nativa na América do Norte, que poderiam produzir vários cortes anuais, além do capim alto do gênero *Miscanthus*, de maior interesse na Europa como fonte de biomassa celulósica.

Na seleção de um cultivo como fonte de matéria-prima para a fabricação de bioetanol, é imperativo considerar os pressupostos de eficiência, em um sentido amplo. Assim, cabe priorizar os cultivos que minimizem os requerimentos de terra, água e aportes externos de agroquímicos, entre outros aspectos. Além disso (e igualmente relevante), a viabilidade econômica deve ser levada em conta, havendo pouco sentido em propor o uso de cultivos nobres e de bom valor de mercado como fonte de bioenergia. A matéria-prima representa entre 60% e 70% do custo final do bioetanol e a busca de alternativas de baixo custo é fundamental. A existência de co-produtos e subprodutos, de valor alimentício, industrial ou energético, é importante, na medida em que pode conferir uma desejável flexibilidade na produção bioenergética, associando a disponibilidade de biocombustíveis a outras fontes de valor econômico.

Outro ponto absolutamente relevante para a adequada seleção de biomassas com potencial para produção de bioetanol é o balanço energético de cada uma delas, ou seja, a relação entre a energia produzida e a demanda de energia direta e indireta para produzir tal energia, sendo mais interessantes os cultivos de alta produtividade e baixa demanda de insumos energéticos exógenos. Esse assunto será tratado no próximo tópico.

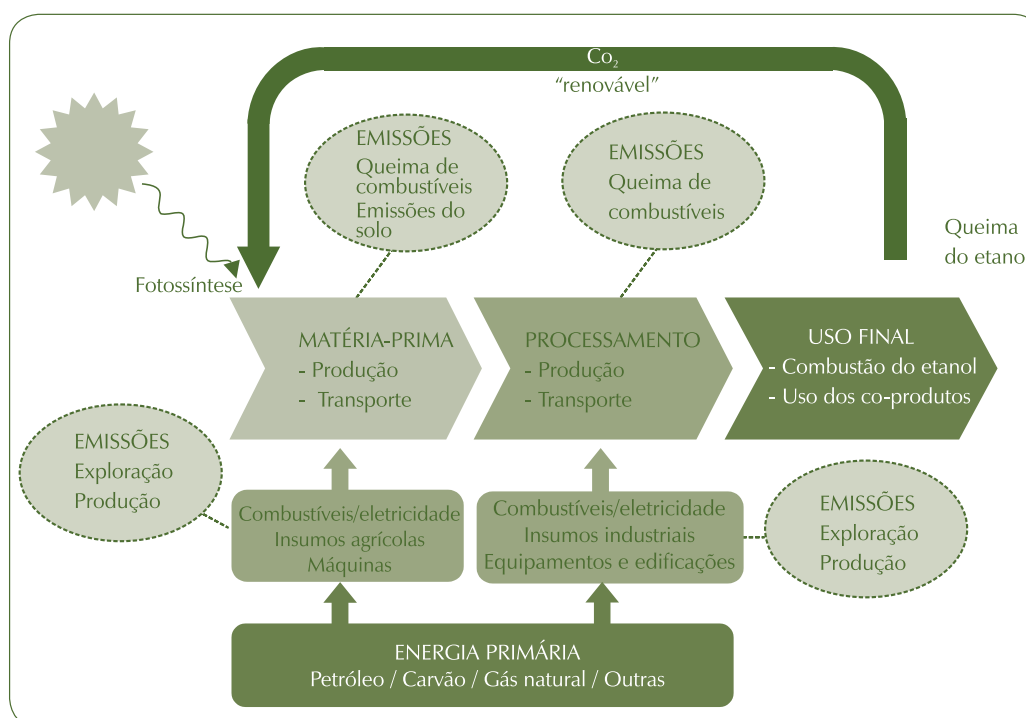
Desse modo, apesar das perspectivas interessantes de alguns cultivos não-convencionais para produção de bioetanol, é importante ter claro seu caráter inovador e a necessidade de estudos agronômicos mais densos para ter seu emprego recomendado de forma extensiva, em boa parte das alternativas. Não obstante a cautela necessária, à medida que avance o conhecimento sobre tais cultivos, a diversificação na oferta de matéria-prima para produção de bioetanol poderá ocorrer em bases consistentes e sustentáveis, eventualmente em nichos particulares de alto interesse, contemplando, por exemplo, cultivos em solos salinos e com baixa exigência de água. Para qualquer cenário, deve ser reiterado que a produção de bioetanol não pode ser considerada substituta da produção agrícola atual, mas uma nova atividade, destinada a utilizar terras marginais em um processo de expansão e diversificação das práticas agrícolas.

3.5 Produtividade, emissões e balanços energéticos

Independentemente da biomassa utilizada para sua produção, o principal objetivo do uso do bioetanol como combustível é a substituição de derivados de petróleo, o que permite diminuir a dependência por tais recursos fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Contudo, a extensão em que um biocombustível pode substituir um combustível fóssil depende, essencialmente, da maneira pela qual ele é produzido. Como todas as tecnologias de produção envolvem (direta ou indiretamente) o uso de recursos fósseis, o benefício associado ao uso de um biocombustível depende da economia efetiva de energia não-renovável que ele proporciona quando comparado ao seu equivalente fóssil. Para o adequado cômputo

das energias envolvidas no processo de produção agroindustrial, devem ser consideradas as emissões de GEE associadas ao seu ciclo de vida, resultantes não só da queima dos combustíveis fósseis (por exemplo, pelos tratores nas operações agrícolas) como daquelas provenientes de outros efeitos (por exemplo, na produção e uso de fertilizantes), conforme esquematizado na Figura 15.

Como pode ser observado na Figura 15, as fronteiras do sistema a ser analisado podem mudar, dependendo do estudo conduzido, mas, em geral, as análises de ciclo de vida visam determinar os gastos de energia e as emissões de GEE desde a produção da matéria-prima até o uso final do combustível. Também são considerados os consumos de energia e emissões associados à produção dos insumos e equipamentos utilizados na cadeia produtiva do biocombustível. É importante notar que, em princípio, todo o CO_2 liberado na queima de produtos da biomassa é reciclado por meio da fotossíntese no crescimento da biomassa no próximo ciclo produtivo, mas a parcela correspondente aos combustíveis fósseis consumidos na produção do bioetanol significa um acréscimo líquido da quantidade desses gases na atmosfera.

***Figura 15* – Diagrama do ciclo de vida de um biocombustível**

Fonte: Seabra (2008).

Recentemente, surgiram alguns questionamentos sobre o impacto da mudança do uso da terra determinada pela produção de matéria-prima para biocombustíveis nas emissões de GEE. Afirma-se que, dependendo da vegetação anterior na área utilizada para a produção do biocombustível, a perturbação provocada pela mudança do uso do solo poderia liberar para a atmosfera uma quantidade de carbono, antes "aprisionado" na vegetação e no solo, suficientemente alta para comprometer o seu benefício ambiental. Essa questão, no entanto, é ainda muito controversa, pelo fato de que a disponibilidade de dados medidos sobre esse efeito ainda não é suficiente para adiantar conclusões.

De todo modo, essa é uma área que merece atenção e mais pesquisas ainda são necessárias para estimar de modo mais consistente a real parcela dessas emissões no ciclo de vida dos biocombustíveis. Não obstante, pelo menos no caso brasileiro, é pouco provável que possam ser associadas perdas de cobertura florestal à produção de bioetanol, pois a expansão da lavoura canavieira ocorreu em áreas antes ocupadas por pastagens de baixa produtividade ou culturas anuais destinadas, em grande parte, à exportação, como a soja, atividades com menor retenção de carbono que a realizada pela cultura da cana-de-açúcar. Outro aspecto a ser levado em conta é o efeito do incremento da colheita de cana crua, com maior quantidade de palha e, portanto, de carbono sendo incorporada ao solo.

Sem explorar essa questão, diversos estudos já foram realizados com o intuito de avaliar os impactos energéticos e ambientais dos biocombustíveis. No caso da cana, considerando a substituição de gasolina e a mitigação das emissões de GEE, já são reconhecidas há bastante tempo as vantagens ambientais do bioetanol no Brasil, desde a divulgação dos primeiros trabalhos mais detalhados sobre o tema [Macedo e Horta Nogueira (1985) e Macedo (1992)]. Desde então, estudos de atualização vêm sendo publicados [Macedo (1998) e Macedo et al. (2004)], acompanhando a evolução das práticas agroindustriais no setor sucroalcooleiro e o avanço do conhecimento sobre os aspectos ambientais.

Na última avaliação publicada, foram analisados os balanços de energia e emissões de GEE para a situação atual e para um cenário para 2020, considerando uma abordagem "do plantio da cana ao portão da usina" [Macedo et al. (2008)]. Com base nas médias dos principais parâmetros agrícolas e industriais de 44 usinas na Região Centro-Sul do Brasil, esse estudo indica que, atualmente, para cada unidade de energia fóssil utilizada na produção do bioetanol de cana, mais de nove unidades de energia renovável são produzidas, na forma de bioetanol e excedentes de energia elétrica e bagaço, como apresentado na Tabela 12. É interessante notar que, mesmo considerando a maior mecanização e o uso de tecnologias agrícolas que devem ampliar a demanda energética em 12% nesse período de 15 anos, o incremento da produção de bioetanol por tonelada de cana processada e, principalmente, a significativa ampliação da produção de energia elétrica deverão permitir que a agroindústria da cana-de-açúcar se mantenha como a mais eficiente forma de produzir biocombustíveis e, em proporções crescentes, bioeletricidade, com expectativas de que a relação de energia (produção/consumo energético) alcance níveis superiores a 11. Essas estimativas assumiram excedentes de energia elétrica de 9,2 kWh e 135 kWh, por tonelada de cana, e taxas térmicas nos siste-

mas de co-geração de 9 MJ/kWh e 7,2 MJ/kWh, respectivamente, para 2005/2006 e 2020, valores compatíveis com as tecnologias disponíveis e em desenvolvimento, que consideram, nesse último caso, a utilização da palha da cana-de-açúcar (40% de recuperação) como combustível suplementar ao bagaço em sistemas com turbinas de extração-condensação de alta pressão e processos com consumo reduzido de vapor (340 kg de vapor por tonelada de cana processada) [Macedo et al. (2008)].

Em termos de emissões de gases de efeito estufa, atualmente a produção do bioetanol anidro de cana-de-açúcar envolve uma emissão de quase 440 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol, com perspectivas de alguma redução nos próximos anos, como mostrado na Tabela 13. Contudo, quando considerado o seu uso em misturas com gasolina, em teores de 25%, como adotado no Brasil, associado aos efeitos devidos ao uso do bagaço e da eletricidade excedentes, a emissão líquida evitada, resultante da diferença entre as emissões na produção e as emissões evitadas, alcança 1.900 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol, para as condições atuais, e possivelmente chegará a níveis superiores a 2.260 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol, para as condições esperadas para 2020, como apresentado na Tabela 14. Isso ocorre porque, quando se substitui a gasolina pelo bioetanol, toda a emissão associada ao uso do combustível fóssil é mitigada, passando a valer somente as emissões relacionadas com a produção do bioetanol, que, por sua vez, dependem da eficiência no uso final desse biocombustível. Para essas avaliações, foi assumido ainda que o bagaço excedente deve substituir óleo combustível em caldeiras e que a energia elétrica produzida na agroindústria do bioetanol passa a ocupar o lugar de energia elétrica gerada com os fatores de emissão médios mundiais (579 e 560 t CO_2eq/GWh para 2005 e 2020, respectivamente) [Macedo et al. (2008)].

Tabela 12 **– Balanço de energia na produção de bioetanol de cana (MJ/tc)**

Componente do balanço energético	2005/2006	Cenário 2020
Produção e transporte de cana	210,2	238,0
Produção do bioetanol	23,6	24,0
Input fóssil (total)	233,8	262,0
Bioetanol	1.926,0	2.060,0
Excedente de bagaço	176,0	0,0
Excedente de eletricidade	82,8	972,0
Output renovável (total)	2.185,0	3.032,0
Produção/consumo energético		
Bioetanol + bagaço	9,0	7,9
Bioetanol + bagaço + eletricidade	9,3	11,6

Fonte: Macedo et al. (2008).

Tabela 13 – **Emissões na produção do bioetanol de cana (kg CO_2eq/m³)**

	2005/2006		Cenário 2020	
Bioetanol	Hidratado	Anidro	Hidratado	Anidro
Emissão total	417	436	330	345
Combustíveis fósseis	201	210	210	219
Queimadas	80	84	0	0
Solo	136	143	120	126

Fonte: Macedo et al. (2008).

Tabela 14 – **Emissões líquidas na produção e no uso do bioetanol de cana (kg CO_2eq/m³)**

	2005/2006		Cenário 2020		
Forma de uso do bioetanol	E100	E25	E100	E100-FFV*	E25
Emissões evitadas	2.181	2.323	2.763	2.589	2.930
Uso da biomassa excedente	143	150	0	0	0
Excedente de eletricidade	59	62	784	784	819
Uso do bioetanol	1.979	2.111	1.979	1.805	2.111
Emissões líquidas	-1.764	-1.886	-2.433	-2.259	-2.585

Fonte: Macedo et al. (2008).
* FFV: veículos flexíveis.

Vale lembrar que esses resultados se baseiam nas condições médias da amostra de usinas do Centro-Sul brasileiro, dentro da qual podem ocorrer variações dos balanços energéticos conforme são considerados os parâmetros agrícolas e industriais individuais de cada usina. A Figura 16 ilustra a influência individual da variação desses parâmetros sobre o uso de energia nas usinas e sobre a relação de energia (produção/consumo de energia), enquanto a Figura 17 apresenta a sensibilidade das emissões de GEE e das emissões líquidas de GEE, considerando os intervalos de variação verificados para essa amostra de usinas. Sob tais limites, esses resultados podem ser considerados característicos para a agroindústria energética baseada na cana-de-açúcar com bons indicadores de desempenho, como praticada em diversos países tropicais com clima favorável a essa cultura.

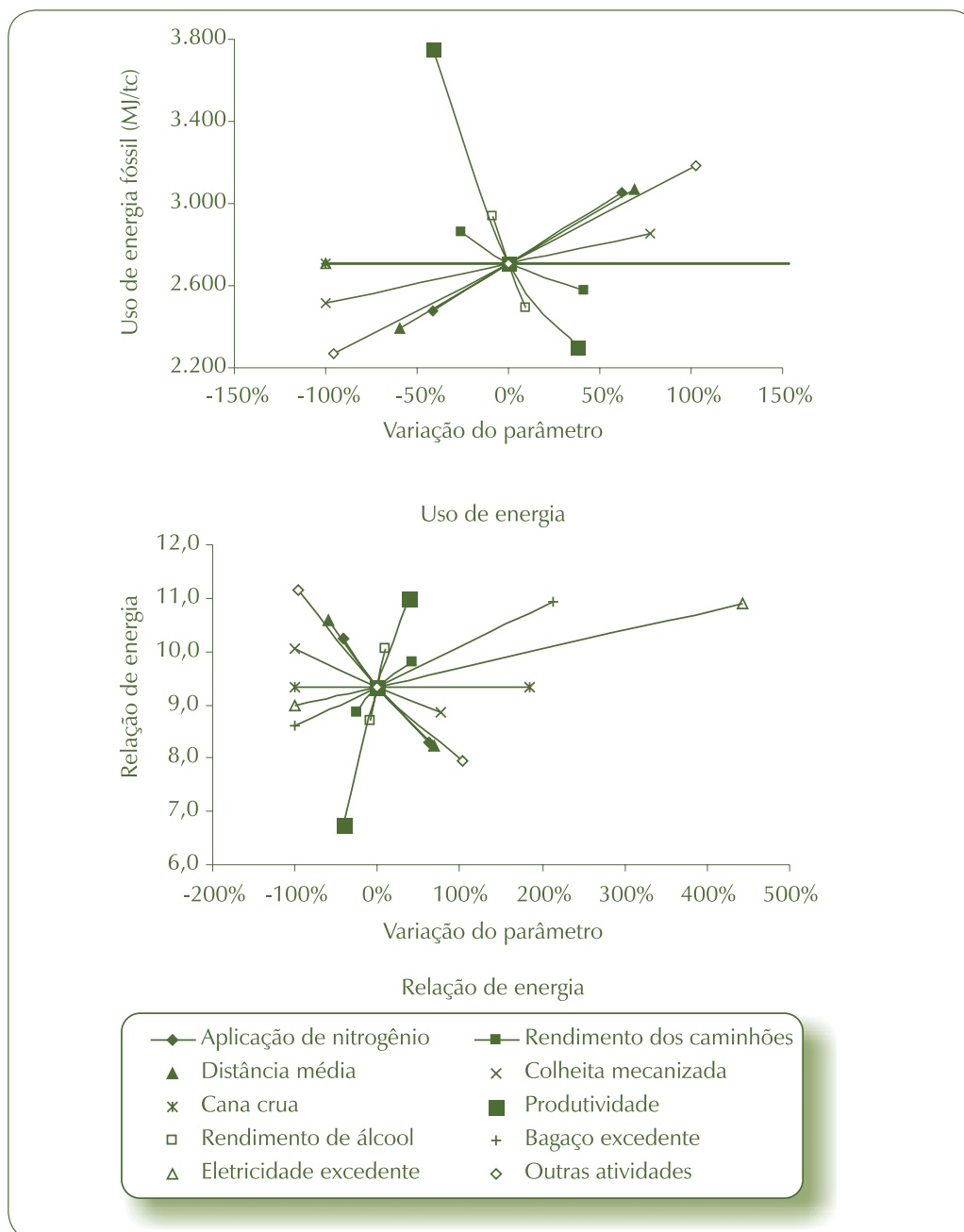
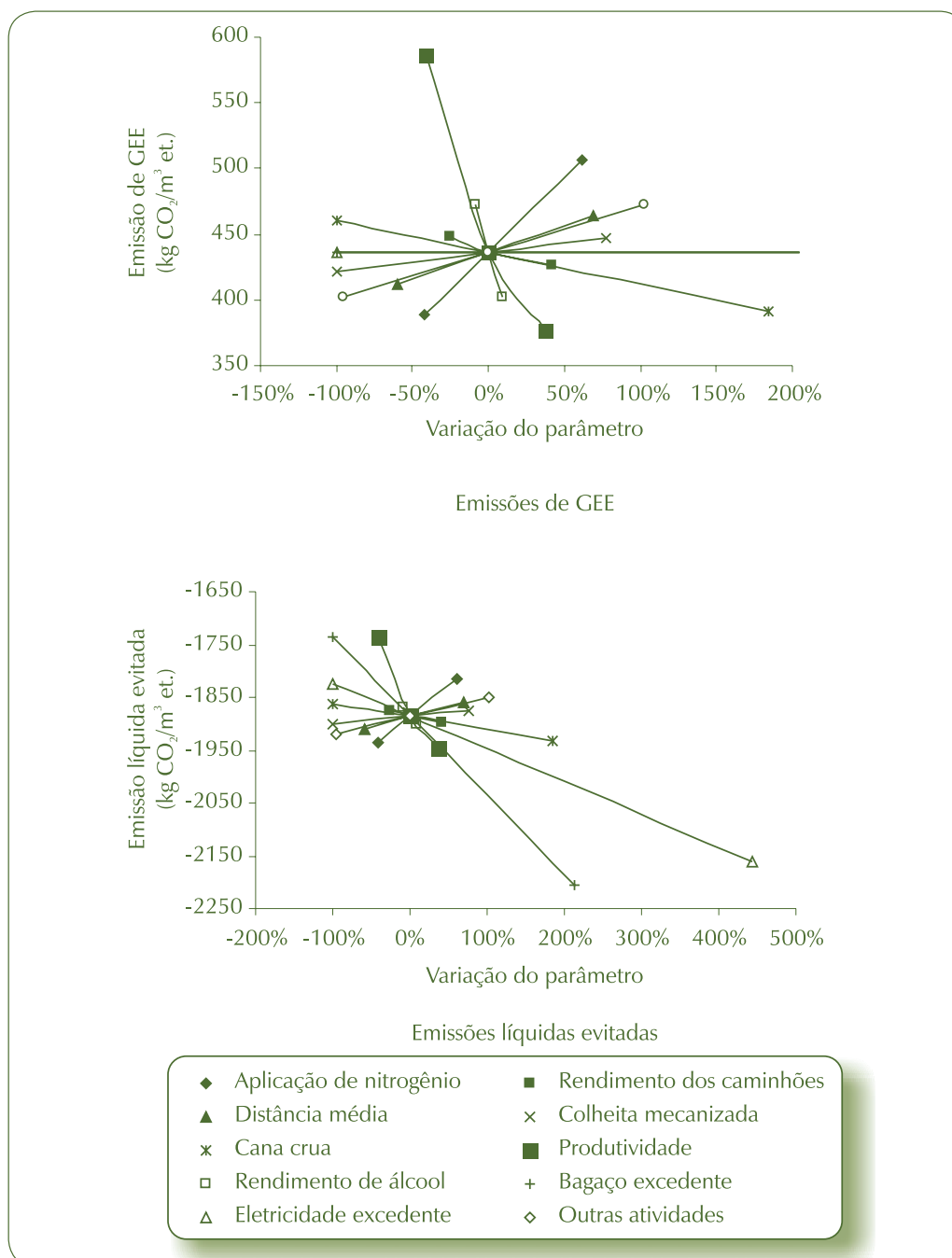
Figura 16 **– Análise de sensibilidade para o uso e a relação de energia para o bioetanol de cana-de-açúcar no cenário atual (2005/2006)**

Fonte: Macedo et al. (2008).

Figura 17 – **Análise de sensibilidade para as emissões de GEE para o bioetanol de cana-de-açúcar no cenário atual (2005/2006)**

Fonte: Macedo et al. (2008).

Atualmente, a produção do bioetanol com base nos açúcares da cana já é uma tecnologia madura, e não há muito espaço para grandes aumentos de rendimento, em particular na fase industrial. Entretanto, para a produção de bioetanol com base em material lignocelulósico da cana, como bagaço e palha, as perspectivas são outras. Hoje em dia, a tendência mais clara é de que as usinas se transformem em unidades produtoras não só de açúcar e bioetanol, mas também de volumes significativos de eletricidade, forma de energia que apresenta qualidade e valor econômico superiores aos dos combustíveis, por unidade de energia produzida. As opções de co-geração mais avançadas, combinadas com configurações de processo com menor demanda de energia, já vêm permitindo que isso seja possível. E para um futuro próximo, uma parte significativa da palha deverá ser agregada como combustível suplementar ao bagaço, possibilitando a geração de energia elétrica em níveis ainda mais elevados e gerando maiores excedentes de energia elétrica, superiores a 100 kWh por tonelada de cana processada. Tendo isso em mente, é razoável esperar que no horizonte de 2020 a relação de energia (produção de energia renovável/consumo de energia fóssil) para o bioetanol de cana seja próxima a 12, com emissões líquidas evitadas de aproximadamente 2.600 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol [Macedo et al. (2008)].

Ao contrário do caso do bioetanol de cana, ainda existe alguma controvérsia sobre os benefícios ambientais do uso do bioetanol de milho em substituição à gasolina. De qualquer forma, não existem dúvidas de que, no melhor dos casos, o benefício é bastante inferior ao conseguido pelo bioetanol da cana. Isso se deve a que, apesar de o processamento do milho para bioetanol demandar uma quantidade de energia significativamente menor que a cana para ser convertida em bioetanol, no caso do milho, toda a energia é proveniente de fontes fósseis. O vapor necessário (10,6 MJ/litro) é produzido em caldeiras a gás natural, e a eletricidade (0,4 kWh/litro) é suprida pela rede pública, que nos EUA depende muito de recursos fósseis [Pimentel e Patzek (2005)].

Em um trabalho comparativo realizado recentemente [EBAMM (2005)], diversos estudos foram analisados, levando à conclusão de que a relação de energia mais representativa para o bioetanol de milho nas condições americanas seria 1,3, já considerando os créditos pelos co-produtos, como o DDGS. No caso das emissões, a produção do bioetanol de milho envolve uma emissão total de cerca de 1.700 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol (também considerando os créditos dos co-produtos), que seria equivalente a uma emissão líquida evitada de 130 kg CO_2eq/m^3 de bioetanol, quando consideramos o seu uso final, como mostrado na Tabela 15. Note-se que esse valor é quase 15 vezes inferior ao observado no caso do bioetanol de cana.

Assim como no caso do bioetanol de cana, a produção de bioetanol com base no milho é também uma tecnologia desenvolvida. Sendo assim, espera-se que os próximos avanços na busca por um melhor desempenho ambiental para o bioetanol de milho estejam concentrados no uso da biomassa restante (palha), como combustível ou como insumo para ampliar a produção de bioetanol, possivelmente através da hidrólise. No entanto, cabe enfatizar que os limites para o aproveitamento dessa biomassa são restritos, dada a sua grande importância para a preservação da qualidade do solo.

Tabela 15 – **Balanço de energia e emissões de GEE para o bioetanol de milho nos EUA**

Fluxos de energia	**Valor**
Consumo na fase agrícola	5,59 MJ/litro
Consumo na fase industrial	15,24 MJ/litro
Consumo total	20,83 MJ/litro
Produção de bioetanol	21,20 MJ/litro
Valor energético dos co-produtos	4,13 MJ/litro
Output total	25,33 MJ/litro
Relação de energia (produção/consumo)	1,2
Balanço de emissões	
Fase agrícola	868 kg CO_2eq/m^3
Fase industrial	1353 kg CO_2eq/m^3
Co-produtos	-525 kg CO_2eq/m^3
Emissão na produção de bioetanol	1696 kg CO_2eq/m^3
Emissões do bioetanol	81 g CO_2eq/MJ
Emissões da gasolina	94 g CO_2eq/MJ
Emissões líquidas	134 kg CO_2eq/m^3

Fonte: Farrell et al. (2006) e EBAMM (2005).

Considerando as outras opções de biomassa para a produção de bioetanol, a situação não é muito diferente, pelo menos para os casos da beterraba, do trigo e da mandioca, como apresentado na Tabela 16, na qual os valores da relação de energia e das emissões evitadas são muito modestos [Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2006) e Nguyen et al. (2007)]. Recorde-se a importância desses parâmetros: a relação de energia representa a energia renovável produzida na cadeia produtiva do biocombustível, dividida pela quantidade de energia não-renovável requerida para sua produção, e as emissões evitadas nessa tabela correspondem à redução percentual das emissões com relação às emissões do ciclo de vida da gasolina, indicando, respectivamente, a consistência energética e ambiental de cada rota tecnológica para a produção de bioetanol.

Por conta desses resultados, além da cana, que já demonstrou suas vantagens energéticas e ambientais como fonte de bioenergia e, particularmente, de bioetanol, para o médio-longo prazo, a esperança está efetivamente depositada também na produção de biocombustível com base em materiais lignocelulósicos, tendo em vista tanto os critérios ambientais quanto o potencial de produção. Contudo, não se trata de uma tecnologia comercial e muitos esforços de pesquisa e demonstração ainda são necessários para que essa possibilidade venha a ser uma opção realmente viável no futuro. Esse tema será retomado adiante.

Tabela 16 – **Comparação das diferentes matérias-primas para a produção de bioetanol**

Matéria-prima	Relação de energia	Emissões evitadas
Cana	9,3	89%
Milho	0,6 – 2,0	-30% a 38%
Trigo	0,97 – 1,11	19% a 47%
Beterraba	1,2 – 1,8	35% a 56%
Mandioca	1,6 – 1,7	63%
Resíduos lignocelulósicos*	8,3 – 8,4	66% a 73%

Fonte: Elaborado com base em Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2007) e Nguyen et al. (2007).
*Estimativa teórica, processo em desenvolvimento.

Desse modo, a redução das emissões de gases de efeito estufa possivelmente é um dos efeitos positivos mais importantes associados ao bioetanol de cana-de-açúcar. Conforme a Comunicação Brasileira para a Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima, com valores para 1994, a utilização da energia da cana reduziu em 13% as emissões de carbono de todo o setor energético. Para os volumes de produção dessa agroindústria no Brasil, em 2003, a substituição de gasolina por bioetanol e a geração de energia com bagaço reduziram as emissões de CO_2 equivalente, respectivamente, em 27,5 milhões e 5,7 milhões de toneladas [Goldemberg et al. (2008)]. Como uma referência para cálculos em situações parecidas, para cada 100 milhões de toneladas de cana destinadas a fins energéticos, poderia ser evitada a emissão de 12,6 milhões de toneladas de CO_2 equivalente, considerando bioetanol, bagaço e o excedente adicional de energia elétrica fornecida à rede [Unica (2007)].

Capítulo 4

Co-produtos do bioetanol de cana-de-açúcar

Além do bioetanol, a agroindústria de cana-de-açúcar produz uma gama crescente de outros produtos de uso final e matérias-primas intermediárias, que ampliam seu significado econômico e permitem, mediante sinergias interessantes, agregar valor ao processo como um todo. Entre esses produtos, destacam-se, naturalmente, o açúcar (na verdade, o produto pioneiro e tradicional dessa indústria) e, nos últimos anos, a energia elétrica, produzida em sistemas de co-geração há décadas e cuja produção está sendo incrementada visando à geração de excedentes para a rede pública, com crescente importância no resultado econômico da agroindústria e na oferta global de eletricidade em muitos países, como o Brasil. Neste capítulo, comenta-se o processo de fabricação dos outros produtos da cana que já apresentam mercado e tecnologia desenvolvida, reservando-se para o próximo capítulo a análise das novas possibilidades ainda em desenvolvimento ou em estágio inicial de comercialização.

4.1 Açúcar e derivados

Componente básico da dieta humana moderna, o açúcar é constituído, essencialmente, de sacarose e foi introduzido no mundo ocidental pelos árabes durante a Idade Média, como especiaria de alto valor. O açúcar de cana começou a ser produzido por Portugal a partir do cultivo em suas colônias do Atlântico e, com a ampla expansão da cultura canavieira no Novo Mundo tropical, transformou-se, de produto de uso restrito ao consumo das elites, em mercadoria de largo emprego em todo o mundo. O açúcar foi importantíssimo para a formação da economia brasileira, representando mais do que o ouro ou qualquer outro produto, e, como relatam os mestres Gilberto Freyre e Câmara Cascudo, ajudou a moldar a sociedade e a personalidade da gente brasileira. Tal importância se observa também em muitos outros países, onde a agroindústria da cana foi e continua sendo um elemento central da atividade econômica.

Atualmente, mais de 130 países produzem açúcar, cuja produção mundial na safra 2006/2007 atingiu 164,5 milhões de toneladas. Cerca de 78% do total foi produzido de cana-de-açúcar, cultivada principalmente em regiões tropicais e subtropicais do hemisfério sul, e o restante utilizando a beterraba açucareira, cultivada sobretudo nas zonas temperadas do hemisfério norte. Como os custos de produção de açúcar de cana são inferiores aos custos com base na beterraba, cada vez mais se amplia a fração produzida pelos países em desenvolvimento, na medida em que são retiradas as barreiras comerciais que impedem o livre comércio desse produto. Assim, esses países deverão ser os responsáveis por quase todo o crescimento futuro da produção, ampliando sua participação na oferta mundial de açúcar de 67%, em 2000, para 72%, até 2010. A Tabela 17 apresenta os principais produtores e exportadores mundiais de açúcar, na safra 2006/2007 [Illovo (2008)].

Tabela 17* – Principais países produtores e exportadores de açúcar para a safra 2006/2007

País	Produção (milhão de toneladas)	Exportação (milhão de toneladas)
Brasil	33.591	22.200
Índia	27.174	1.341
União Européia	16.762	1.228
China	11.630	–
Estados Unidos	7.661	–
Tailândia	7.011	4.528
México	5.543	380
África do Sul	5.419	2.339
Austrália	5.156	3.958
Paquistão	3.813	–

Fonte: Illovo (2008).
*Valores preliminares.

Considerando essa safra, os cinco maiores exportadores – Brasil, Tailândia, Austrália, África do Sul e Guatemala – devem abastecer cerca de 80% de todas as exportações mundiais de mercado livre, excetuando os mercados preferenciais ou em cotas. Tal conformação dos mercados do açúcar foi comentada no Capítulo 2 e é interessante observar que a parcela comercializada nos mercados internacionais é pequena frente à produção, já que 69% da produção mundial é consumida, atualmente, no país de origem [FAO (2007b)]. Desse modo, as eventuais variações no volume produzido em cada país, em função das condições climáticas, podem provocar mudanças importantes na disponibilidade do produto e, conseqüentemente, no seu preço. Como exemplo, a Índia, que avança para a primeira posição entre os países produtores de açúcar, tem apresentado, em alguns anos, excedentes exportáveis, enquanto, em outros, se torna uma grande importadora desse produto.

Além da volatilidade natural de um mercado com suprimento variável e uma elasticidade-preço relativamente baixa, contribuem para os movimentos de preço do açúcar no mercado internacional as condições de mercado dos outros adoçantes, como a glucose de milho (*high fructose corn syrup* – HFCS) e os adoçantes de baixa caloria, que, em 2005, respondiam por 18% do mercado mundial de adoçantes. Nesse sentido, nos últimos anos, a glucose de milho, com largo emprego na indústria de alimentos, vem cedendo seu mercado para o açúcar de cana, por conta da elevação do preço de sua matéria-prima.

O consumo mundial de açúcar tem se expandido de modo regular a uma taxa anual de 2% ao longo das últimas décadas, o que significa cerca de 3 milhões de toneladas a mais na demanda a cada ano. O crescimento tem ocorrido principalmente nos países em desenvolvimento, como um reflexo do aumento da renda dos consumidores e das mudanças nos padrões alimentares. Esses mercados já representam mais de 60% do atual consumo mundial de açúcar, com expectativas de que os países asiáticos respondam pela maior parcela da expansão da demanda desse produto [FAO (2007b)]. Tal comportamento pode ser observado no mercado indiano, em que, nos últimos 25 anos, o consumo *per capita* de açúcar passou de 6 kg/ano para 17 kg/ano, enquanto o de outros adoçantes tradicionais (gur e khandsari, produzidos artesanalmente de cana) reduziu-se de 14 kg/ano para 9 kg/ano [India Infoline (2008)]. Em outro mercado asiático importante, a China, espera-se que a população esteja consumindo 14 milhões de toneladas de açúcar por ano até 2010, que representaria um consumo *per capita* de 10 kg/ano, valor que ainda mantém o país bem abaixo da média mundial, em torno de 24 kg/ano [FAO (2007b)]. O Gráfico 11 apresenta o consumo anual *per capita* de açúcar para diversos países.

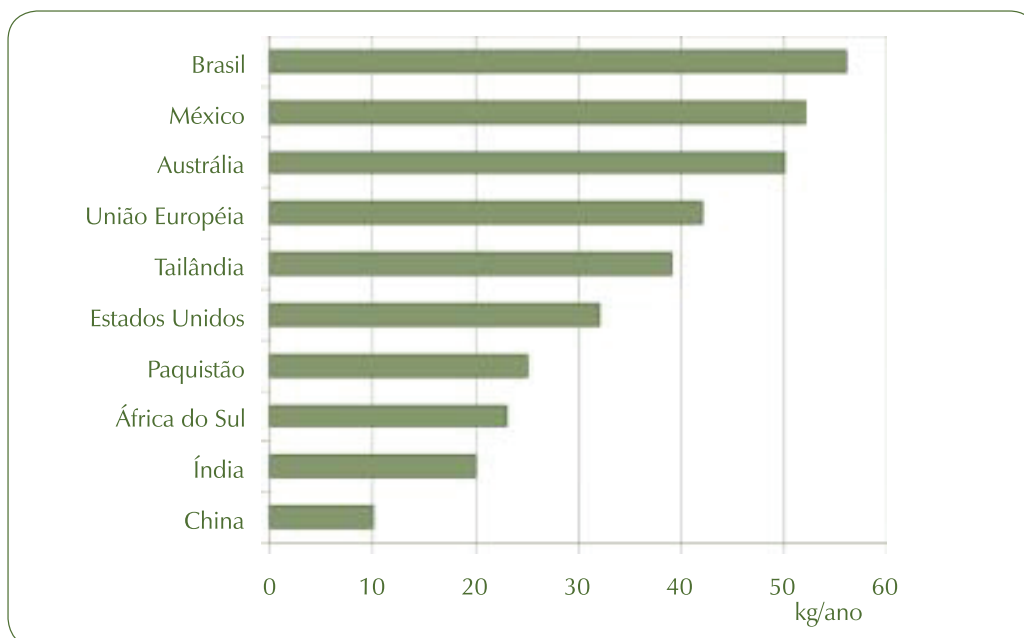
Além do açúcar cristal e do açúcar refinado, têm surgido no âmbito da indústria canavieira produtos adoçantes diferenciados, com melhores preços para o produtor, e que atingem segmentos específicos do mercado consumidor. Esse é o caso do açúcar orgânico, produzido sem agroquímicos ou aditivos artificiais, e dos açúcares mesclados com adoçantes de baixas calorias, como o aspartame ou a sucralose, produzida com base na própria sacarose da cana-de-açúcar.

As possibilidades do açúcar orgânico

A evolução do comportamento dos consumidores, valorizando produtos considerados mais saudáveis e com menor teor de aditivos químicos, vem abrindo um mercado interessante para a agroindústria canavieira, com impactos ambientais positivos na produção e no processamento da cana-de-açúcar. Um bom exemplo é apresentado pelo Grupo Balbo, que em 1986 iniciou o Projeto Cana Verde, integrando pioneiramente tecnologias avançadas com as tradicionais técnicas naturais de cultivo da cana-de-açúcar, para oferecer uma linha de alimentos orgânicos, na qual se destaca o açúcar Native, fabricado desde o ano 2000 pela Usina São Francisco e atualmente comercializado em 40 países, respondendo por quase 22% do faturamento desse grupo.

Para um produto agroindustrial ser considerado orgânico, não é suficiente que a matéria-prima utilizada seja cultivada sem agrotóxicos, sendo necessário repensar e adequar todo o sistema produtivo. A produção orgânica se associa ao manejo conservacionista e equilibrado dos recursos naturais utilizados, como terra e água, sob uma visão integrada e de respeito à natureza, certificada de forma independente por terceiros. Aplicando esse conceito em 13.400 hectares de canaviais, totalmente certificados para a produção orgânica, foram adotados a colheita da cana crua, a adubação orgânica (até mesmo com subprodutos reciclados do processamento industrial), empregando variedades de cana com boa resistência natural a pragas, e o manejo das plantas espontâneas e insetos segundo técnicas manuais, mecânicas e biológicas. Sob tais condições, o potencial ecológico da cana é valorizado e se preserva a fertilidade do solo, com ganhos nos índices de produtividade, que, após alguns anos de adaptação, têm se situado significativamente acima da média das demais usinas. A produção orgânica mantém padrões elevados de desempenho ambiental também na etapa industrial, com baixo uso de produtos químicos e procedimentos de alto nível para controle do processo, acompanhamento operacional e segurança. Do mesmo modo, a eficiência energética tem sido alcançada mediante a implantação de sistemas de co-geração eficientes, com a obtenção e a comercialização de créditos de carbono nos termos do Protocolo de Quioto.

Como componente relevante da produção de açúcar orgânico, a proteção à biodiversidade da flora e da fauna no contexto das áreas agrícolas tem sido promovida com bons resultados. Houve um significativo esforço para a formação e a recuperação de florestas com espécies nativas e, em comparação com outras propriedades agrícolas da mesma região, a Usina São Francisco apresenta até seis vezes mais espécies de aves e uma boa variedade de mamíferos, inclusive carnívoros, como a onça-parda e o lobo-guará, segundo informações do Inventário da Fauna realizado na região, confirmando a recuperação das cadeias ecológicas. Todo o processo agroindustrial e suas implicações ambientais são acompanhados periodicamente por diversas instituições certificadoras internacionais do Brasil, dos Estados Unidos, da Europa e do Japão [Native (2008)].

Gráfico 11 – **Consumo de açúcar *per capita* em diversos países**

Fonte: Illovo (2008).

A produção de açúcar, com base em diferentes matérias-primas e em diversos contextos, apresenta uma larga faixa de custos de produção. O Brasil destaca-se como o de menor custo entre todos os países produtores, seguido por diversos países africanos [F. O. Licht (2007)]. Desde uma perspectiva bioenergética, é importante mencionar que o baixo custo do açúcar brasileiro está, em grande parte, relacionado ao desenvolvimento da tecnologia agrícola e industrial desse setor, associado à expansão da produção de bioetanol. Além disso, o baixo custo se deve ao fato de a própria produção açucareira se processar junto com a fabricação de bioetanol, como já explicado no capítulo anterior, o que confere expressivas vantagens operacionais e de qualidade de produto. Em poucas palavras: o Brasil logrou tornar-se o maior produtor de açúcar e com o menor custo porque associou sua produção ao bioetanol.

4.2 Bioeletricidade

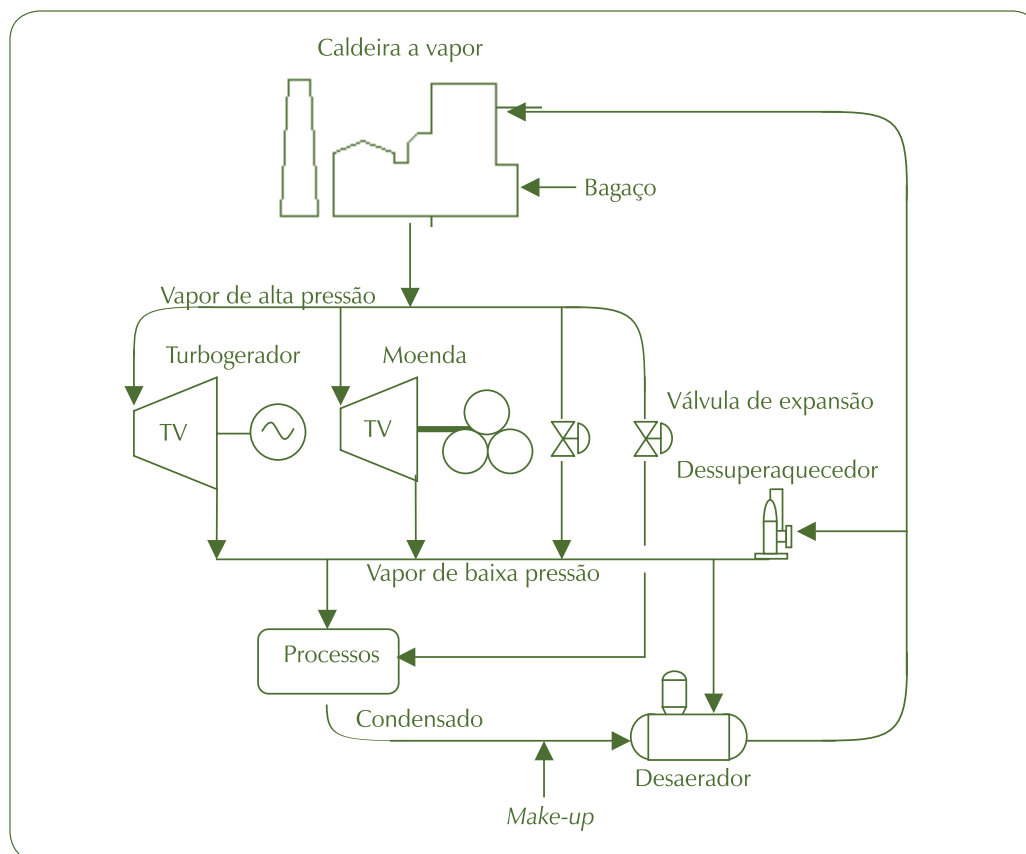
Na cana, cerca de um terço da energia solar absorvida é fixada como açúcar, enquanto o restante corresponde à fibra vegetal, composta de celulose, hemicelulose e lignina, que constituem o bagaço e a palha. O uso desses biocombustíveis apresenta crescente interesse, com o bagaço sendo empregado como fonte de energia, especialmente na agroindústria canavieira.

No processamento industrial da cana, são necessários três tipos de energia: energia térmica para os processos de aquecimento e concentração, energia mecânica nas moendas e demais sistemas de acionamento direto, como bombas e ventiladores de grande porte, bem como energia elétrica para acionamentos diversos, bombeamento, sistemas de controle e iluminação, entre outros fins. Para atender a essas demandas energéticas, desenvolve-se, nas usinas de açúcar e bioetanol, a produção simultânea de diferentes formas de energia com base em um único combustível, o bagaço. Tal tecnologia é denominada co-geração e representa um diferencial importante da cana em relação às outras matérias-primas usadas para a fabricação de açúcar ou bioetanol, que necessitam de aporte energético externo para o processo industrial.

A Figura 18 apresenta o esquema usualmente adotado para o sistema de co-geração na agroindústria canavieira em todo o mundo, no qual as principais variações ocorrem na pressão do vapor produzido nas caldeiras [Seabra (2008)]. Em síntese, utilizando o calor liberado pela combustão do bagaço nas caldeiras, produz-se vapor de alta pressão, utilizado em turbinas a vapor para geração elétrica e acionamentos mecânicos, cujo vapor de escape, a baixa pressão, atende aos usos térmicos. Essa concepção básica comporta diversas variantes construtivas, que podem ampliar a produção de energia elétrica por tonelada de cana processada, sob investimentos mais elevados. Embora se utilize, praticamente, apenas o bagaço como combustível na agroindústria, crescentemente se incorpora também parte dos resíduos de colheita, a palha da cana.

Em condições típicas, o balanço de vapor de uma usina é, em geral, equilibrado, isto é, a oferta de vapor atende suficientemente à demanda. Com efeito, pode-se afirmar que, ao longo de seu desenvolvimento, essa agroindústria foi se ajustando para manter esse equilíbrio, compensando os incrementos do volume de açúcares a processar, decorrentes de melhorias de qualidade da cana, com ganhos na eficiência dos sistemas de geração e uso de vapor. Considerando valores representativos das usinas brasileiras na atualidade, similares à de outros países, no processamento de uma tonelada de cana, a disponibilidade de bagaço (com 50% de umidade) é da ordem de 250 kg, que permite produzir entre 500 kg e 600 kg de vapor, da mesma ordem do consumo no processo, entre 400 kg e 600 kg de vapor [Leal (2007)]. Nesse contexto, com uma gestão responsável das demandas de vapor e com a adoção de caldeiras mais eficientes, é possível obter sobras de bagaço. De todo modo, os ganhos mais interessantes acontecem na etapa de geração de potência, anterior ao uso do vapor no processo.

Esses ganhos são possíveis porque, na produção de energia elétrica e mecânica na agroindústria da cana, observa-se um grau de liberdade importante, dado essencialmente pela condição do vapor produzido nas caldeiras e utilizado pelas turbinas a vapor. Enquanto a pressão do vapor na saída dessas turbinas, por imposição do processo industrial, fica, em geral, próxima a 2,5 bar, sua condição na entrada pode ser escolhida em uma ampla faixa, de acordo com a caldeira empregada, e gerando uma potência proporcional à sua energia térmica, função de sua pressão e temperatura na saída da caldeira. Praticamente sem variar a quantidade de combustível, é possível aumentar a produção de energia elétrica na agroindústria canavieira adotando caldeiras e turbinas que operem com vapor a pressões e temperaturas mais elevadas.

Figura 18 – **Configuração usual do sistema de co-geração na agroindústria canavieira**

Fonte: Seabra (2008).

É interessante observar como, durante as últimas décadas, os parâmetros do vapor foram sendo aos poucos incrementados no caso brasileiro, em uma evolução que tem sido replicada em outros países [Horta Nogueira (2006a)]. Até 1980, as usinas do Estado de São Paulo possuíam caldeiras com pressões entre 12 bar e 22 bar e compravam 40% da energia elétrica consumida. Em 1990, com a paulatina substituição das caldeiras e turbinas antigas, a pressão média do vapor nessas usinas havia atingido 22 bar, com temperaturas de 300° C, suficientes para permitir a auto-suficiência no suprimento de energia elétrica e a produção de algum excedente para venda. Em condições típicas, as usinas brasileiras consomem como potência de eixo, no preparo e moagem da cana, cerca de 16 kWh por tonelada de cana, que se somam à demanda de energia elétrica, da ordem de 12 kWh por tonelada de cana [Macedo et al. (2006)]. Assim, plantas com capacidade de geração acima de 28 kWh por tonelada de cana processada tipicamente passam a disponibilizar excedentes energéticos para comercialização com a rede pública.

Com a valorização mais recente desses excedentes e a possibilidade de venda de energia elétrica para as concessionárias, surge em muitos países um novo ciclo de modernização dos sistemas de co-geração na agroindústria canavieira, com diversas usinas implantando sistemas de pressões elevadas, com significativa produção de excedentes de bioeletricidade. Como fatores importantes de estímulo à geração de energia elétrica no contexto canavieiro, destacam-se a demanda por maior eficiência e menor impacto ambiental no setor energético, a evolução do marco regulatório do setor elétrico e o desenvolvimento de tecnologias para o controle dos sistemas de co-geração de médio porte.

A co-geração é, intrinsecamente, muito superior à geração termelétrica convencional, em termos de eficiência. As tecnologias termelétricas convencionais convertem em energia útil, tipicamente, cerca de 30% e, em condições-limite, até 50% da energia fornecida pelo combustível, rejeitando de forma irreversível uma parcela relevante de energia térmica para o meio ambiente. Os sistemas de co-geração, ao destinarem o calor rejeitado para o atendimento das necessidades térmicas de processo, permitem obter eficiências superiores a 85% no uso da energia do combustível, com evidentes benefícios na economicidade e na redução dos impactos ambientais. Apesar dessas vantagens, a postura monopolística das empresas de energia elétrica e a rigidez do marco regulatório praticamente impediam a operação interligada de autoprodutores, com a transação dos excedentes disponíveis. Felizmente, essas condições têm evoluído de modo positivo e, em diversos países, a agroindústria canavieira se torna cada vez mais um agente importante na oferta de energia elétrica. Nesse sentido, o caso brasileiro é emblemático: nos primeiros cinco anos da presente década, a oferta de energia da cana-de-açúcar para a rede pública se expandiu a uma taxa anual de 67% [Moreira e Goldemberg (2005)].

Com a possibilidade de comercializar excedentes de bioeletricidade, as usinas de açúcar e bioetanol passaram também a valorizar os resíduos sólidos da colheita, que podem incrementar ainda mais a disponibilidade de energia elétrica. Naturalmente, o emprego da palha da cana nas caldeiras, representando cerca de 140 kg por tonelada de cana colhida, traz novas questões de ordem prática, referentes à colheita, ao manuseio e à operação das caldeiras com esse biocombustível, mas que aos poucos vêm sendo enfrentadas com sucesso, permitindo que esses biocombustíveis sólidos possam ser colhidos e trazidos para as plantas industriais a preços convenientes (entre US$ 0,80 e US$ 1,80 por GJ). Entretanto, recomenda-se que cerca da metade da palha seja mantida sobre o solo, por razões agronômicas, como a redução da erosão, o reciclo de nutrientes e a manutenção de um nível mínimo de umidade no solo [Hassuani et al. (2005)]. Outro tema associado à geração de bioeletricidade voltada para a comercialização tem a ver com a operação em períodos fora da safra, quando inexiste a demanda de calor de processo, e que impõe o armazenamento de bagaço, mas que também vem sendo implementado em usinas de diversos países com resultados favoráveis, dependendo da matriz de oferta energética e das condições particulares de despacho.

Na Tabela 18, mostra-se como as condições do vapor afetam diretamente a geração de excedentes energéticos nas usinas de açúcar e bioetanol. Para o cálculo desses valores, foram considerados: uma produção de 280 kg de bagaço (50% de umidade) por tonelada de cana,

vapor para processo a 2,5 bar de pressão e o uso de turbinas a vapor de contrapressão, exceto nos casos em que se assume a operação fora da safra ou com baixos consumos de vapor de processo, situações que impõem o emprego de turbinas de condensação, com o condensador operando a 0,12 bar. Nos dois casos em que se considera a utilização da palha, assume-se que 50% permanecem no campo, o que significa uma disponibilidade efetiva de 70 kg desse biocombustível por tonelada de cana colhida.

***Tabela 18* – Energia elétrica e bagaço excedente em sistemas de co-geração na agroindústria canavieira**

Parâmetros do sistema de co-geração	Consumo de vapor de processo	Período de geração	Uso da palha	Energia elétrica excedente	Bagaço excedente
21 bar, 300° C	500 kg/tc	safra	não	10,4 kWh/tc	33 kg/tc
42 bar, 400° C	500 kg/tc	safra	não	25,4 kWh/tc	50 kg/tc
42 bar, 450° C	500 kg/tc	safra	não	28,3 kWh/tc	48 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	safra	não	57,6 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	safra	não	71,6 kWh/tc	0 kg/tc
65 bar, 480° C	500 kg/tc	ano todo	50%	139,7 kWh/tc	13 kg/tc
65 bar, 480° C	350 kg/tc	ano todo	50%	153,0 kWh/tc	0 kg/tc

Fonte: CGEE (2005).

Como se observa na Tabela 18, há um importante incremento dos excedentes de energia elétrica exportável associado à elevação da pressão. Além disso, para o contexto avaliado, com a redução do consumo do vapor de processo de 500 kg para 350 kg de vapor por tonelada de cana processada (kg/tc), tem-se um aumento de 24% nos excedentes de energia elétrica, e com utilização parcial da palha, os excedentes se ampliam em 141%. Vale ainda observar que, atualmente, têm sido implementados sistemas de co-geração no Brasil com caldeiras operando acima de 90 bar, com uma geração estimada, nesses casos, de 146 kWh por tonelada de cana, para a rede pública [Seabra (2008)]. Em outro estudo, indica-se que, considerando a tecnologia mais eficiente ora disponível no âmbito dos sistemas a vapor para as usinas de açúcar – com geração de vapor a 105 bar e 525° C, redução da demanda de vapor de processo para 280 kg por tonelada de cana, aproveitamento total do bagaço e de 50% das pontas e folhas, com operação durante todo o ano –, seria possível entregar excedentes de 158 kWh por tonelada de cana processada para a rede da concessionária [Walter e Horta Nogueira (2007)].

As tecnologias em desenvolvimento com a utilização de turbinas a gás, associadas a gaseificadores, apresentadas no próximo capítulo, permitirão elevar a energia gerada para níveis superiores a 180 KWh.

Assumindo a operação de uma usina de açúcar e bioetanol nas condições típicas do Centro-Sul brasileiro, com uma moagem anual de 2 milhões de toneladas de cana, sistemas de co-geração convencionais a 65 bar e 480° C correspondem a uma capacidade instalada de geração de 31 MW, enquanto, para sistemas otimizados a 90 bar e 520° C, essa potência passa a ser 82 MW, para operação durante a safra [Seabra (2008)]. Em que pese a possibilidade de alcançar significativos ganhos energéticos com a utilização de altos parâmetros de vapor nesses sistemas de co-geração, a opção por pressões mais elevadas visando aumentar a geração de energia elétrica excedente implica investimentos proporcionalmente mais elevados, cuja amortização depende, entre outras variáveis, do quadro tarifário, do marco regulatório e das perspectivas de oferta no setor elétrico, condições essencialmente externas ao negócio usual das usinas. Não obstante, é notável a expansão da capacidade de geração das usinas de açúcar, como bem sinaliza o caso brasileiro [CGEE (2005)].

Segundo os registros da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em março de 2008, a capacidade instalada para geração elétrica com base no bagaço de cana alcançava 3.081 MW, enquanto outros 460 MW estavam em construção ou aguardavam outorga para operar [Aneel (2008)]. Considerando valores de 2006, essas centrais responderam por uma geração de 8.357 GWh, cerca de 2% da produção brasileira de eletricidade [MME (2008)]. Apenas para o Estado de São Paulo, que responde por cerca de 60% da produção brasileira de açúcar e bioetanol e cujas 131 usinas processaram 264 milhões de toneladas de cana na safra 2006/2007, informa-se uma capacidade instalada de 1.820 MW, com excedentes para a rede pública de 875 MW [Silvestrin (2007)]. Também considerando apenas esse estado, a expansão prevista para a geração de excedentes de energia elétrica pela agroindústria canavieira é significativa, como mostra o Gráfico 12. Para todo o Brasil, a capacidade de geração de energia elétrica para a rede pública com base no bagaço poderá alcançar 15 GW até 2015, ou 15% da atual potência instalada nas centrais elétricas brasileiras. Há perspectivas de que os resultados econômicos da produção de bioeletricidade se equiparem à produção de açúcar nas usinas mais modernas, incluindo a produção de bioetanol, açúcar e energia elétrica [F. O. Licht (2008a)]. Em um horizonte mais distante, considerando as demandas previstas de bioetanol e as disponibilidades de bagaço associadas à sua produção, Walter e Horta Nogueira (2007) estimam que, em 2025, a capacidade instalada poderia chegar a 38,4 GW (caso seja utilizado o bagaço para produção de bioetanol por hidrólise e caso as caldeiras empreguem apenas 60% da palha disponível) ou 74,7 GW (caso todo o bagaço e 60% da palha sejam usados para produzir bioeletricidade).

Com o provável desenvolvimento de processos para produção de bioetanol com base no bagaço, ganha interesse a análise das condições de competitividade relativa dessa biomassa, ou seja, cabe procurar as rotas de maior atratividade econômica. Nesse sentido, uma avaliação comparativa preliminar do valor econômico entre dois produtos alternativos do bagaço – a bioeletricidade e o bioetanol por hidrólise – é apresentada nos gráficos a seguir. No Gráfico 13, o valor econômico do bagaço é definido pela tarifa de venda da energia elétrica, considerando dois valores de custo unitário da capacidade de geração elétrica. De modo análogo, no Gráfico 14, estima-se o valor do bagaço quando utilizado para produção de bioetanol por

hidrólise (que será mais bem discutida no próximo capítulo), assumindo uma produtividade de 378 litros de bioetanol por tonelada de bagaço seco. Nesse caso, os valores de custo de capital e operação da unidade industrial foram tomados da literatura, variando, conforme o nível de maturidade tecnológica, entre US$ 0,26 e US$ 0,13 por litro de bioetanol produzido, respectivamente, para curto prazo e para após 2010 [IEA (2007)].

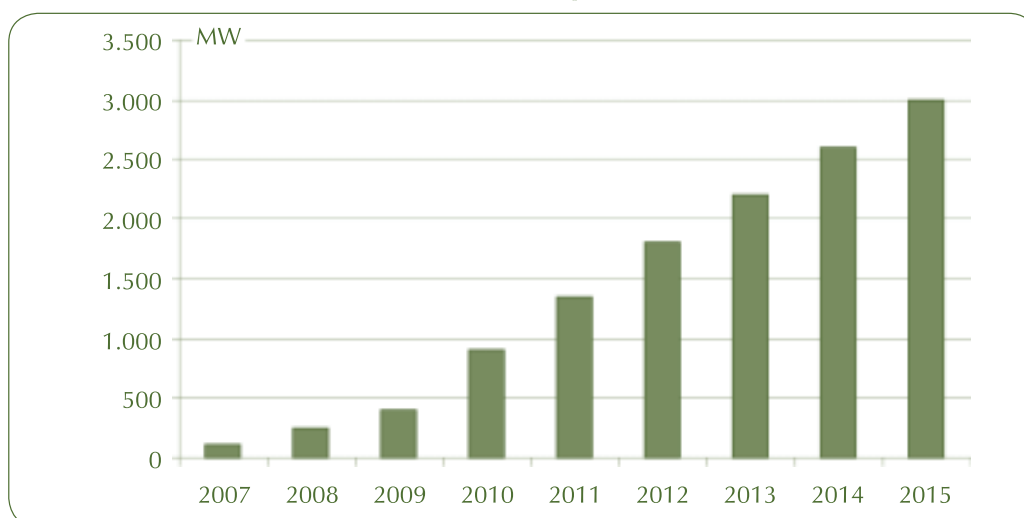
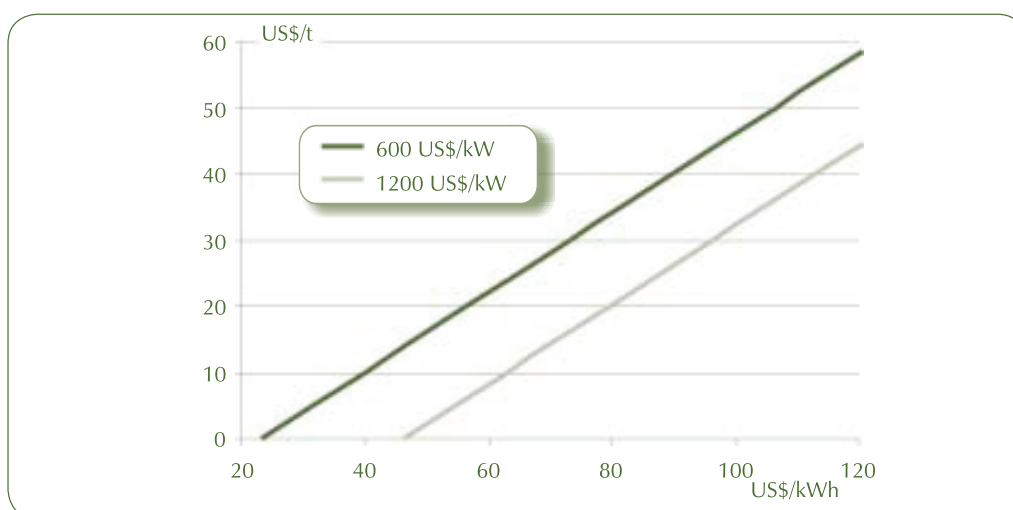
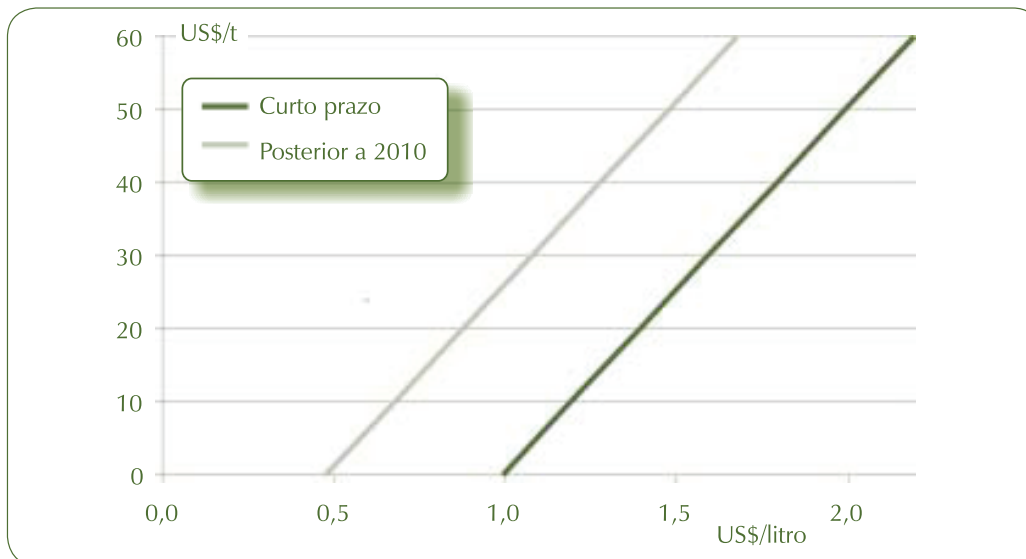
***Gráfico 12* – Capacidade dos sistemas de co-geração a serem instalados em usinas de açúcar e bioetanol no Estado de São Paulo nos próximos anos**

Fonte: Silvestrin (2007).

***Gráfico 13* – Valor do bagaço utilizado para geração de eletricidade**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Evolução da produção de eletricidade em uma usina brasileira

Usina Vale do Rosário, do grupo Santelisa Vale.

Um exemplo representativo da evolução pela qual têm passado as usinas de açúcar e etanol no Brasil em busca de maiores excedentes de energia elétrica é dado pela Usina Vale do Rosário [Heck (2006)]. Localizada em Morro Agudo, São Paulo, essa usina processa atualmente em torno de 5 milhões de toneladas de cana por safra. Em 1986, tiveram início as modificações em seu sistema energético, que nessa época atendia a toda a demanda agroindustrial, mas sem excedentes. A motivação para a introdução de aperfeiçoamentos foi dada pela existência de potencial para a produção de mais energia elétrica (grande expansão de vapor direto para atender à demanda de vapor de escape e excedentes de bagaço) e a postura favorável da concessionária (CPFL) para a aquisição de excedentes. Em uma primeira fase, mantendo as caldeiras operando a 22 bar e 280° C, foram introduzidas turbinas a vapor mais eficientes e procedimentos para racionalização do uso de vapor, que permitiram, na safra de 1993, uma produção de 4,7 kWh excedentes por tonelada de cana processada e o estabelecimento de um contrato de dez anos com a CPFL para a venda de 4 MW durante a safra. Em uma segunda fase, implementada entre 1995 e 1997, foram adquiridas duas caldeiras novas para 44 bar e 430° C e um turbogerador de 12 MW, que incrementaram a produção de excedentes para 16,5 kWh por tonelada de cana e justificaram um novo contrato com a CPFL para a venda de 15 MW a partir de 1998, motivando a construção de uma nova subestação e uma linha de transmissão de 16 km em 138 kV. Na fase subseqüente, completada em 2001, foram instalados novos turbogeradores, utilizando turbinas de extração/condensação e que permitiram renovar o contrato com a concessionária para a entrega de 30 MW. Na última fase, concluída em 2005, foi introduzida uma caldeira produzindo 200 toneladas de vapor por hora, a 65 bar e 515° C, que levaram a usina a uma geração de 65 MW excedentes, correspondentes a 60 kWh por tonelada de cana processada.

Gráfico 14 – **Valor do bagaço utilizado para produção de etanol**

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Os Gráficos 13 e 14 permitem obter uma interessante conclusão. O valor de oportunidade do bagaço para produção de energia elétrica, tendo em vista as tarifas usuais de energia elétrica (acima de US$ 60 por kWh, a valores de 2005) e os preços de mercado do bioetanol (geralmente, em torno de US$ 0,50 por litro), indica claramente a maior atratividade da produção de bioeletricidade frente à produção de bioetanol, pelo menos no atual cenário de preços dos vetores energéticos. Essa constatação independe, em princípio, de aspectos estratégicos associados ao planejamento energético, que reforçam a atratividade da oferta de eletricidade, no caso brasileiro, e de combustíveis líquidos, no caso norte-americano.

O uso de bagaço para geração de energia elétrica permite reduzir as emissões de carbono para a atmosfera, já que substitui o óleo combustível queimado nas termelétricas convencionais, mais acionadas exatamente na época da safra, que ocorre nos meses de baixa hidraulicidade e menor capacidade de geração hidrelétrica. Nesse caso, a redução de emissões é da ordem de 0,55 tonelada de CO_2 equivalente por tonelada de bagaço utilizado. Tal redução de emissões de gases de efeito estufa é elegível para a obtenção de créditos de carbono, apresentando adicionalidade (a redução de emissões de gases de efeito estufa deve ser adicional àquelas que ocorreriam na ausência da atividade) e com uma metodologia de linha de base consolidada aprovada (Método AM0015 – "Co-geração com base em bagaço interligada a uma rede elétrica"), para quantificação e certificação desses créditos (reduções certificadas de emissões, RCEs), nos termos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL (Clean Development Mechanism – CDM), como estabelecido pelo Protocolo de Quioto.

No caso brasileiro, a responsabilidade pela conformidade e o acompanhamento dos projetos de MDL é da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), vinculada ao Ministério de Ciência e Tecnologia. Até março de 2008, existiam 24 projetos brasileiros de co-geração com bagaço de cana registrados na Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), correspondendo a uma redução total de 461 mil toneladas nas emissões anuais de CO_2. Os fatores de emissão adotados dependem da região onde os projetos estão situados, valendo 0,136 e 0,2826 toneladas de CO_2 equivalente por kWh gerado, respectivamente, no Nordeste e no Centro-Sul, no período de 2004 a 2006 [MCT (2008) e Ecoinvest (2008)].

Para finalizar a discussão sobre a bioeletricidade como um co-produto relevante da agroindústria canavieira, é oportuno comentar o potencial do desenvolvimento tecnológico nesse campo. No capítulo a seguir, será abordado em mais detalhes o processo de gaseificação do bagaço, que poderá incrementar de modo significativo a geração de energia elétrica, com expectativas de produção superiores a 180 kWh por tonelada de cana processada. Outro processo que tem motivado novos estudos para a produção de bioeletricidade é a biodigestão da vinhaça, que, sem reduzir seu potencial fertilizante, poderá proporcionar excedentes adicionais de energia elétrica às usinas de bioetanol. Estima-se que a vinhaça resultante da produção de um metro cúbico de bioetanol, tratada anaerobiamente (na ausência de oxigênio), produz 115 metros cúbicos de biogás, capazes de gerar, por sua vez, 169 kWh de bioeletricidade, já descontados os consumos de processo [Lamonica (2006)]. Não obstante, os elevados custos associados à biodigestão da vinhaça ainda limitam o interesse nesse processo.

Em uma avaliação das possibilidades futuras de conversão energética na agroindústria da cana, conjugando diferentes produtos e rotas tecnológicas, possivelmente disponíveis nos próximos 20 anos, Macedo (2007) estima que poderia ser resgatado até 59% do conteúdo energético total da cana, como biocombustível e bioeletricidade, rendimento bem superior aos atuais 38%. E mais especificamente sobre energia elétrica, em uma exploração dos limites termodinâmicos da produção de energia elétrica com base na cana em cenários tecnológicos mais avançados, Lora et al. (2006) consideraram diferentes alternativas complementares e associadas, em dois cenários básicos: maximização da produção de combustíveis e maximização da geração de bioeletricidade. Nesse sentido, com a utilização de tecnologias ainda em desenvolvimento ou reduzida difusão, como os gaseificadores de bagaço associados a turbinas a gás, biodigestores de vinhaça e células de combustível que utilizam bioetanol reformado, seria possível atingir mais de 510 kWh de energia elétrica por tonelada de cana processada. Vale observar que esse potencial representa, efetivamente, apenas cerca de 25% do potencial energético da cana, considerando a energia disponível no açúcar e na fibra, da ordem de 7.200 MJ por tonelada de cana. Em outras palavras, o limite superior para a produção de energia elétrica com base na cana é dezenas de vezes superior à geração média atualmente observada nas usinas brasileiras, que apenas agora estaria começando a ser desenvolvida de fato.

4.3 Outros co-produtos do bioetanol de cana-de-açúcar

De modo similar ao milho, que dá origem a uma diversificada gama de produtos, a cana-de-açúcar permite produzir bem mais do que bioetanol, açúcar e eletricidade. Entre os co-produtos tradicionais da cana, poderiam ser citados o melaço, a aguardente, o bagaço, a levedura, a torta de filtro e a vinhaça, enquanto a lista dos novos produtos, numerosa e variada, inclui desde realçadores de sabor para a indústria de alimentos até plástico para embalagens. Um denso estudo publicado no Brasil em 2005 apresenta mais de 60 tecnologias empregando a cana-de-açúcar como matéria-prima em diferentes setores industriais [IEL/Sebrae (2005)], tendo sido a principal fonte de informações para o presente tópico. Inicialmente, apresentam-se breves comentários sobre os produtos tradicionais e, a seguir, trata-se dos produtos inovadores, boa parte deles relacionados com a indústria de alimentos. Os produtos ainda em desenvolvimento serão comentados no próximo capítulo.

O melaço – mel pobre ou mel residual da fabricação de açúcar – é amplamente usado para produção de bioetanol nas destilarias anexas às usinas, mas também pode ser utilizado para alimentação animal ou para a cultura de fungos e bactérias em outros processos de fermentação voltados para a fabricação de produtos químicos e fármacos, bem como para produção do fermento biológico bastante empregado em panificação. Nesse âmbito, a levedura é o extrato seco obtido mediante três processos alternativos: a sangria do leite de levedura ou do fundo de dorna ou ainda da vinhaça, constituindo um suplemento protéico de baixo custo, empregado como componente de ração animal e na indústria de alimentos. Estima-se que, para cada litro de bioetanol, são produzidas entre 15 e 30 gramas de levedura seca [Leal (2008) e Pesquisa Fapesp (2002)].

O bagaço é valorizado principalmente como combustível, além de constituir uma fonte de celulose para as indústrias de papel e papelão. Em São Paulo, o bagaço possui efetivo valor comercial, graças à sua capacidade energética, e é utilizado regularmente em indústrias cerâmicas e no processamento da laranja, entre outras aplicações. O bagaço pode ser tratado para melhorar sua digestibilidade e incorporar fontes de nitrogênio para seu uso na alimentação bovina. A vinhaça e a torta de filtro apresentam um bom valor como fertilizantes e são empregadas intensamente na própria agroindústria, que absorve toda a disponibilidade desses produtos na reforma e na manutenção da fertilidade dos canaviais que lhe atendem.

O gás carbônico produzido nas dornas de fermentação é, geralmente, lavado para recuperar o bioetanol arrastado e liberado na atmosfera, mas pode ser purificado, desodorizado, liquefeito e armazenado sob pressão para outros fins, como na produção de refrigerantes e gelo seco, na fabricação de bicarbonato de sódio e no tratamento de efluentes. Do balanço de massa na fermentação, tem-se que, na fabricação de mil litros de bioetanol anidro, são produzidos até 760 kg de gás carbônico. Algumas usinas brasileiras de bioetanol têm implementado unidades de beneficiamento de gás carbônico, como a Usina JB Açúcar e Álcool, em

Vitória de Santo Antão, em Pernambuco, que durante a safra produz 528 toneladas mensais de gás carbônico de grau alimentar [Carbogás (2008)].

Enquanto os produtos anteriores, tradicionais, são capazes de agregar valor de forma limitada à produção de bioetanol (tanto assim, que são denominados subprodutos), os produtos inovadores representam o resultado da incorporação de tecnologias de maior complexidade, com maior significado econômico, e que impõem sempre uma etapa adicional de processamento, como na produção de ácidos e aminoácidos por rotas fermentativas. A Tabela 19 apresenta uma visão geral dos novos produtos da cana-de-açúcar já comercializados ou em início de comercialização. Esse mercado apresenta boas perspectivas porque, entre outras razões, é formado por produtos menos agressivos ao meio ambiente e, em alguns casos, aplicados em setores economicamente importantes.

O ácido cítrico é produzido há décadas no Brasil por processo de fermentação, utilizando culturas do fungo *Aspergillus niger* em substrato de melaço dissolvido em água. Esse ácido é um insumo usado para preservação de alimentos, além de dar-lhes sabor. Serve também para limpeza de equipamentos industriais e fabricação de detergentes e outros produtos de higiene e limpeza. As dificuldades para sua produção em bases econômicas têm a ver com a manutenção de cepas produtivas e um controle acurado das condições do ambiente.

Entre os aminoácidos que podem ser produzidos por meio da fermentação de açúcares, destaca-se a lisina, cujo mercado principal, além das aplicações farmacêuticas, é a formulação de rações de aves e suínos, que tem crescido bastante. Esse aminoácido é denominado essencial porque os animais, assim como os humanos, não têm as vias enzimáticas para sintetizá-lo, requerendo seu suprimento por via alimentar. Entretanto, como a maior parte da alimentação animal, composta de carboidratos vegetais, é altamente deficiente em lisina assimilável, justifica-se sua adição à ração. Daí o alto interesse na lisina, cujas importações brasileiras nos últimos anos foram de 10 mil toneladas por ano.

Tabela 19 **– Novos produtos da agroindústria da cana-de-açúcar**

Família	Matéria-prima	Produtos
Biotecnológicos: materiais produzidos com base nas funções biológicas de organismos vivos	Melaço	a) Ácido cítrico b) Aminoácidos: lisina c) Defensivos agrícolas: regulador de crescimento ou fitorreguladores (ácido indolacético, ácido jasmônico), praguicida (biofungicida, controlador biológico, inseticida biológico, praguicida biológico) d) Fixador de nitrogênio e) Inóculo para silagem
Químicos: produtos resultantes de reações químicas efetuadas com ou sem a presença de um elemento catalisador	Melaço, bagaço e vinhaça	a) Insumos industriais (dextrana técnica, gluconato de cálcio, manitol, sorbitol e tensoativos biodegradáveis) b) Furfural (licor de xilose, furfural, álcool furfurílico, compostos furano-epóxi, preservante de madeira, resinas de fundição) c) Plásticos (PHB e PHB/hl, PHA mcl/PHB hpe). d) Insumos para a indústria de papel e celulose (meio para corrugar, pastas quimitermomecânicas, meios filtrantes) e) Vinhaça concentrada
Fármacos-veterinários: substâncias químicas, biológicas, biotecnológicas ou de preparação manufatureira, diretamente ministradas ou misturadas aos alimentos, destinadas a prevenir e tratar as enfermidades dos animais	Melaço e bagaço	a) Preparado antidiarréico b) Complexo ferro-dextrana c) Probiótico
Alimentos	Melaço, bagaço e vinhaça	a) Derivados da levedura, frutose e glicose b) Frutooligossacarídeos c) Xaropes invertidos por via enzimática d) Cogumelos comestíveis da espécie *Pleurotus ostreatus*
Biológicos	Bagaço	a) Composto fertilizante
Estruturais: materiais cujas propriedades os tornam utilizáveis em estruturas, máquinas ou produtos consumíveis	Bagaço	a) Aglomerados de bagaço/cimento b) Aglomerados MDF

Fonte: Modificado de IEL/Sebrae (2005).

É oportuno observar as maneiras pelas quais a agroindústria da cana vem se diversificando no Brasil, em um ambiente de maior complexidade tecnológica e geração de valor, no qual a implementação de processos voltados para novos produtos da cana-de-açúcar ocorre em duas vertentes. Na primeira delas, a indústria sucroalcooleira tem procurado diversificar sua linha de produtos, como ocorreu com o grupo Zillo Lorenzetti ao fundar, no final de 2003, a Biorigin, empresa de biotecnologia especializada na produção de ingredientes naturais para a indústria de alimentação humana e animal, ou com as dezenas de empresas que têm implementado processos de secagem de levedura para sua comercialização, como nas usinas Santa Adélia, São Martinho, Santo Antônio, São Francisco, Viralcool, Andrade, São Carlos, Galo Bravo, Cresciumal, Santa Cruz OP, Jardest, São José da Estiva, Cerradinho, Equipav, Nova América, Pitangueira e Bonfim [IEL/Sebrae (2005)]. Cerca de 50% da levedura produzida se destina ao mercado interno, no qual é utilizada principalmente na alimentação de aves (cerca de 50%) e suínos (cerca de 30%). Os outros 50% da produção são exportados, em sua maior parte (80%) para países do Sudeste Asiático, onde a levedura é empregada para alimentar peixes e camarões. Considerando um preço de referência de US$ 12,5 por kg de levedura seca [IEL/Sebrae (2005)], a produção de levedura permite obter de US$ 187 a US$ 375 por mil litros de bioetanol produzido, um resultado expressivo em termos do rendimento econômico do processo agroindustrial.

Na segunda vertente, no desenvolvimento desse segmento, outros setores industriais, como alimentício e químico, têm incorporado, de forma crescente, matérias-primas associadas à cana. Nessa linha, a Alltech, multinacional do ramo de alimentos animais, instalou em 2005, junto à Usina Vale do Ivaí, no Paraná, uma unidade de produção de levedura com capacidade de 50 mil toneladas anuais, que deverá destinar 80% da produção ao mercado externo [JornalCana (2005)]. Esse também é o caso das empresas Ajinomoto, do Japão, e Cheil Jedang, da Coréia do Sul, que instalaram no Brasil unidades voltadas para a produção de lisina aproveitando a tecnologia e o baixo custo do açúcar, matéria-prima que passa a substituir o milho e a soja, utilizados em outros países. Juntas, as duas novas fábricas passarão a produzir 180 mil toneladas por ano, quando completarem suas plantas. As vantagens econômicas são importantes: transformada em lisina, a saca de 50 quilos vale US$ 50, ou seja, cerca de sete vezes mais do que o próprio açúcar [Inovação Unicamp (2008)]. Cabe reiterar a grande integração entre a agroindústria canavieira e a produção de alimentos proporcionada por essas indústrias.

Finalmente, com relação aos novos produtos, é importante observar que, a par da significativa agregação de valor a eles associada, os investimentos em plantas são relativamente pequenos, em comparação com uma usina de bioetanol. Talvez o maior desafio a enfrentar para a adequada promoção e difusão desses processos seja o domínio das tecnologias envolvidas, que pressupõe o conhecimento aplicado da moderna biotecnologia e todo o aparato de instrumentação e controle que ela compreende.

Capítulo 5

Tecnologias avançadas na agroindústria da cana-de-açúcar

A diversidade de produtos da cana-de-açúcar não se esgota com os tópicos do capítulo anterior. A seguir, apresentam-se as tecnologias inovadoras para a utilização da cana como insumo industrial e energético, envolvendo a produção de bioetanol e considerando processos voltados para a valorização dos materiais lignocelulósicos, mediante sua hidrólise ou gaseificação, e a produção de plásticos biodegradáveis, baseando-se essencialmente nos estudos de Seabra (2008). Inclui-se ainda neste capítulo uma revisão das oportunidades de emprego do bioetanol como insumo básico para a indústria petroquímica (ou alcoolquímica), campo no qual já se desenvolveram projetos importantes há algumas décadas e que ora é retomado em novas iniciativas.

À medida que toda a cana, com seus açúcares e fibras, passa a ser uma fonte de materiais de interesse, passível de ser utilizada em uma ampla gama de produtos em processos integrados e interdependentes, as usinas de açúcar e bioetanol se configuram cada vez mais no contexto das chamadas biorrefinarias, que mimetizam as atuais refinarias da indústria do petróleo, mas em novas bases, renováveis e ambientalmente mais saudáveis.

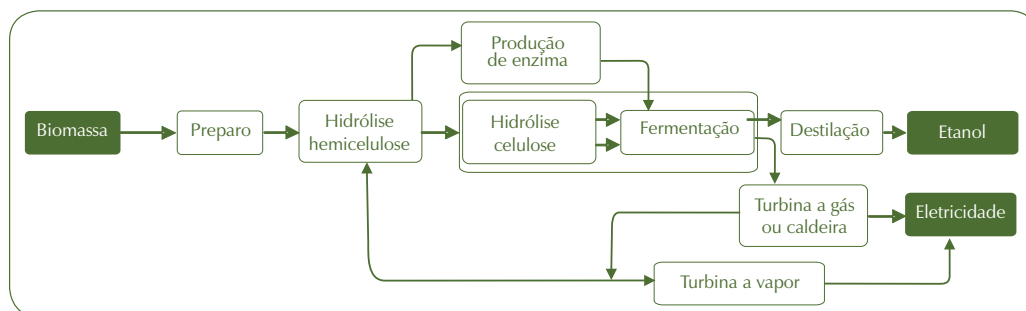
5.1 Hidrólise de resíduos lignocelulósicos

Como apresentado no Capítulo 3, com exceção da cana, as tecnologias comercialmente disponíveis na atualidade para a produção de bioetanol por meio do amido e de açúcares, como no caso do milho e da beterraba, envolvem ganhos energéticos e ambientais bastante estreitos. Além disso, essas matérias-primas apresentam uma limitada vantagem econômica e encontram, em geral, mercados alternativos mais remuneradores, como alimentos ou insumos para outros fins. Entretanto, apesar de suas destacadas vantagens, a cana-de-açúcar não é uma opção viável para todas as regiões do planeta. Por esse motivo, os países do hemisfério norte vêm procurando incessantemente rotas tecnológicas que permitam a produção de um biocombustível eficiente, tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista econômico. Atualmente, predomina a idéia de que, para o futuro próximo, entre cinco e dez anos, a tecnologia de produção de bioetanol por meio da hidrólise de materiais celulósicos venha a representar essa sonhada alternativa. Porém, existem grandes obstáculos por superar e é difícil predizer com confiança o tempo que, efetivamente, vai levar esse desenvolvimento.

O bioetanol vem sendo produzido pela hidrólise e fermentação de materiais lignocelulósicos desde o fim do século XIX, mas somente nos últimos 20 anos essa tecnologia tem sido proposta para atender o mercado de combustíveis. Os principais programas de pesquisa e desenvolvimento são conduzidos nos Estados Unidos e na Europa, basicamente em escalas experimentais de produção, mas seu sucesso poderia transformar o bioetanol em um biocombustível passível de ser produzido em quase todas as regiões do mundo, aproveitando a alta disponibilidade de resíduos orgânicos de diversas fontes [Macedo (2005b)]. Praticamente todos os resíduos de biomassa, produzidos nas atividades agrícolas e industriais, e mesmo o lixo urbano apresentam elevados teores de materiais lignocelulósicos.

As tecnologias para a obtenção de bioetanol com base em materiais lignocelulósicos envolvem a hidrólise dos polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentescíveis e sua posterior fermentação para a produção do bioetanol. Para executar essa tarefa, a hidrólise utiliza tecnologias complexas e multifásicas, com base no uso de rotas ácidas e/ou enzimáticas para a separação dos açúcares e remoção da lignina. Uma configuração genérica e simplificada do processo é apresentada na Figura 19.

Ao contrário dos processos termoquímicos, a composição e a estrutura da biomassa têm forte influência na natureza e nos rendimentos dos processos de hidrólise e fermentação. Na realidade, muito esforço de pesquisa deverá estar focado no melhor entendimento da formação dos componentes da estrutura vegetal e como seria possível modificá-la para aumentar os rendimentos do processo de hidrólise [DOE (2006)], já que a hidrólise somente é eficiente, de fato, após alguma separação das frações da biomassa.

***Figura 19* – Esquema do processo de produção de etanol por meio da hidrólise da biomassa**

Fonte: Seabra (2008).

A biomassa lignocelulósica é composta por polissacarídeos (celulose e hemicelulose) e pela lignina, polímero complexo de grupos metoxi e fenilpropânicos, que mantém as células unidas. A fração celulósica (40%-60% da matéria seca) é um polímero linear do dímero glicose-glicose (celobiose), rígido e difícil de ser quebrado; sua hidrólise gera glicose, um açúcar de seis carbonos, cuja fermentação com *Saccharomyces cerevisiae* já é bem conhecida. Por sua vez, a fração hemicelulósica (20%-40%), em geral, é constituída de uma cadeia principal de xilose (ligações β-1,4) com várias ramificações de manose, arabinose, galactose, ácido glicurônico etc. A hemicelulose é muito mais fácil de ser hidrolisada do que a celulose, mas a fermentação dos açúcares de cinco carbonos (pentoses) ainda não é tão desenvolvida quanto os processos envolvendo a glicose. Já a estrutura bioquímica da fração de lignina (10%-25%) não está relacionada a moléculas simples de açúcar, não sendo pretendida, pois, para a produção de bioetanol por rotas fermentativas. Essa fração, no entanto, desempenha um papel fundamental para o sucesso da tecnologia de hidrólise. Apesar de ser possível produzir diversos produtos com base na lignina, atualmente o foco dos estudos tem se voltado para o uso desse material como fonte de energia para os processos, o que garantiria a auto-suficiência e, eventualmente, até a possibilidade de exportar alguma energia elétrica excedente. Naturalmente, essa situação é positiva tanto para a viabilidade econômica da tecnologia quanto para os quesitos ambientais, já que reduziria a dependência por recursos energéticos fósseis externos.

De forma geral, a primeira etapa do processo consiste no pré-tratamento mecânico da matéria-prima, que visa à limpeza e à "quebra" do material, a fim de causar a destruição da sua estrutura celular e torná-la mais acessível aos tratamentos químicos ou biológicos posteriores. A etapa seguinte consiste na remoção da lignina e na hidrólise da hemicelulose, que também pode ser denominada pré-tratamento. Para essa etapa, existem diversos tipos de processos, com diferentes rendimentos e efeitos distintos sobre a biomassa e conseqüente impacto nas etapas subseqüentes. Na Tabela 20, são apresentados os métodos mais utilizados.

Tabela 20 – **Processos para pré-tratamento da biomassa para hidrólise**

Processo	Descrição	Tempo de reação	Rendimento de xilose	Custo*
Físicos				
Explosão de vapor	A biomassa triturada é tratada com vapor (saturado, 160°-260° C) seguido de uma rápida descompressão	1-10 min	45%-65%	–
Termoidrólise	Utiliza água quente a alta pressão (pressões acima do ponto de saturação) para hidrolisar a hemicelulose	30 min	88%-98%	–
Químicos				
Hidrólise ácida	Por meio do uso de ácidos sulfúrico, clorídrico, ou nítrico, concentrados ou diluídos	2-10 min	75%-90%	+
Hidrólise alcalina	Pelo uso de bases, como hidróxidos de sódio ou cálcio	2 min	60%-75%	++
Organosolv	Uma mistura de um solvente orgânico (metanol, bioetanol e acetona, por exemplo) com um catalisador ácido (H_2SO_4, HCl) é usada para quebrar as ligações internas da lignina e da hemicelulose	40-60 min	70%-80%	
Biológicos	Utilização de fungos para solubilizar a lignina. Geralmente, é utilizado em combinação com outros processos			
Combinados				
Explosão de vapor catalisada	Adição de H_2SO_4 (ou SO_4) ou CO_2 na explosão de vapor pode aumentar a eficiência da hidrólise enzimática, diminuir a produção de compostos inibidores e promover uma remoção mais completa da hemicelulose	1-4 min	88%	–
Afex (*ammonia fiber explosion*)	Exposição à amônia líquida a alta temperatura e pressão por um certo período de tempo, seguida de uma rápida descompressão		50%-90%	
Explosão de CO_2	Similar à explosão de vapor		75%	

Fonte: Elaborado com base em Hamelinck et al. (2005).
* O sinal + indica efeito vantajoso (menor custo).

Na etapa de hidrólise propriamente dita, a celulose é convertida em glicose, segundo a seguinte reação, que pode ser catalisada por ácido diluído, ácido concentrado ou enzimas (celulase):

$$n\ C_6H_{10}O_5 + n\ H2O \rightarrow n\ C_6H_{12}O_6 \quad (3)$$

A hidrólise ácida (tanto concentrada quanto diluída) ocorre em dois estágios para aproveitar as diferenças entre a hemicelulose e a celulose. O primeiro envolve a hidrólise da hemicelulose, conduzida conforme as condições do pré-tratamento discutidas anteriormente. No segundo estágio, temperaturas mais altas são aplicadas, buscando otimizar a hidrólise da fração celulósica [Dipardo (2000)]. O processo com ácido diluído utiliza altas temperaturas e pressões, com tempos de reação de segundos a alguns minutos, o que facilita o uso de processos contínuos. Já os processos com ácido concentrado são conduzidos em condições mais brandas, mas com tempos de reação tipicamente mais longos [Graf e Koehler (2000)]. A Tabela 21 apresenta uma comparação entre os diferentes processos de hidrólise.

***Tabela 21* – Comparação das diferentes opções para a hidrólise da celulose**

Processo	Insumo	Temperatura	Tempo	Sacarificação
Ácido diluído	$< 1\%\ H_2SO_4$	215° C	3 min	50%-70%
Ácido concentrado	$30\%-70\%\ H_2SO_4$	40° C	2-6 h	90%
Enzimático	Celulase	70° C	1,5 dia	75%-95%

Fonte: Elaborado com base em Hamelinck et al. (2005).

No processo enzimático, a hidrólise é catalisada por enzimas chamadas genericamente de celulases; na realidade, trata-se de um complexo enzimático composto por endoglucanases (que atacam as cadeias de celulose para produzir polissacarídeos de menor comprimento), exoglucanases (que atacam os terminais não-redutores dessas cadeias mais curtas e removem a celobiose) e β-glucosidases (que hidrolisam a celobiose e outros oligômeros à glicose) [Philippidis e Smith (1995)]. Assim como nos processos ácidos, existe a necessidade de um pré-tratamento para expor a celulose ao ataque das enzimas.

Como o processo enzimático é conduzido em condições brandas (pH 4,8 e temperatura entre 45° e 50° C), o custo de utilidades é relativamente baixo [Sun e Cheng (2002)], além de permitir maiores rendimentos, possibilitar a fermentação simultânea à sacarificação (processo SSF – *simultaneous saccharification and fermentation*) e apresentar baixo custo de manutenção (não há problema de corrosão). Por conta de seu grande potencial de evolução e redução de custos, muitos especialistas vêem a hidrólise enzimática como a chave para a produção de bioetanol a um custo competitivo no longo prazo [Dipardo (2000) e Lynd et al. (1996)].

Comparativamente, tem-se a hidrólise com ácido diluído num estágio mais avançado do que as demais, mas com graves limites de rendimento (50%-70%). A hidrólise com ácido concen-

trado apresenta rendimentos maiores e menores problemas com a produção de inibidores, embora a necessidade de recuperação do ácido e de equipamentos resistentes à corrosão comprometa o desempenho econômico do processo. A hidrólise enzimática, por sua vez, já apresenta altos rendimentos (75%-85%), e grandes melhorias ainda são esperadas (85%-95%). Além disso, a não-utilização de ácidos pode representar grandes vantagens não só econômicas (equipamentos com materiais mais baratos e menor custo operacional), como também ambientais (não há produção de resíduos). É importante observar que, na maioria dos casos, esses processos ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento, com experimentos conduzidos em volumes reduzidos. Para os sistemas reais, com grandes volumes, tais rendimentos deverão ser naturalmente menores.

Independentemente do método, a fermentação dos açúcares do hidrolisado a bioetanol segue os mesmos princípios do que é observado para o caso da produção com base em amido ou açúcares. No caso da hidrólise, no entanto, boa parte do hidrolisado é composta por açúcares de cinco carbonos, os quais não podem ser fermentados por linhagens selvagens de *S. cerevisiae*. Até o momento, a maioria dos processos ou descarta essa fração dos açúcares, ou realiza a fermentação em duas etapas, comprometendo bastante sua viabilidade econômica.

Para o futuro, a tendência é que essas transformações possam acontecer simultaneamente num menor número de reatores, necessitando de microrganismos capazes de fermentar ambos os açúcares com alto rendimento. Para isso, os pesquisadores têm recorrido à engenharia genética para adicionar rotas metabólicas de pentose em leveduras e outros microrganismos bioetanologênicos e também melhorar o rendimento dos microrganismos que já têm a capacidade de fermentar ambos os açúcares. Muito embora se tenha conseguido sucesso nesse sentido, a fermentação de misturas dos açúcares da biomassa ainda não atingiu um patamar comercialmente viável [Galbe e Zacchi (2002), Lynd et al. (2005) e Gray et al. (2006)]. Ainda é preciso considerar os inibidores nocivos à fermentação presentes no hidrolisado (ácidos, furanos, compostos fenólicos etc.), os quais devem ser removidos caso sua concentração seja alta, ou requeiram a utilização de linhagens robustas de microrganismos resistentes.

Para o caso da hidrólise enzimática, hoje se considera que o processo com sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) seja uma opção "possível" (apesar de ainda não estar otimizada), a qual reduziria substancialmente os problemas de inibição. Uma evolução desse processo é a inclusão da co-fermentação de substratos com múltiplos açúcares, que permite o consumo de pentoses e hexoses no mesmo reator. Mas, no momento, essa configuração (SSCF – *simultaneous saccharification and co-fermentation*) ainda está sendo testada em escala-piloto e deve ser o foco de desenvolvimento para médio prazo. O final da evolução da tecnologia parece ser o estabelecimento do bioprocesso consolidado (CBP – *consolidated bioprocessing*), no qual as quatro transformações biológicas envolvidas na produção do bioetanol (produção de enzimas, sacarificação, fermentação de hexoses e fermentação de pentoses) ocorrem em uma única etapa. Nesse caso, microrganismos termofílicos produziriam anaerobicamente

complexos enzimáticos com melhor atividade celulolítica que as típicas enzimas de fungos e fermentariam todos os açúcares liberados no mesmo reator [Wyman (2007)].

Tendo em vista todas essas possibilidades, espera-se, ao longo do tempo, algum aumento de rendimento de bioetanol, mas, principalmente, a redução dos custos de produção. Num amplo trabalho prospectivo realizado há pouco tempo [Hamelinck et al. (2005)], estimou-se que, para o curto prazo, a hidrólise enzimática com pré-tratamento com ácido diluído estaria num nível comercial. Para esse caso, o processo poderia recuperar cerca de 35% da energia da biomassa na forma de bioetanol e um total de 38% incluindo a eletricidade excedente. O custo do bioetanol seria de 22 €/GJ, considerando um custo de biomassa de 3 €/GJ e investimento de 2.100 €/kW de bioetanol (valores de 2003). Já para o longo prazo, com base numa possível configuração de processo CBP, a recuperação de energia como bioetanol poderia atingir 47%, totalizando 52% juntamente com a eletricidade excedente. Mas a principal vantagem esperada é a enorme redução do custo do bioetanol, que poderia chegar a 9 €/GJ, considerando que o custo da biomassa possa ser reduzido para 2 €/GJ e a necessidade de investimento para 900 €/kW de bioetanol. Para esses valores, a energia considerada sempre se refere ao poder calorífico superior (PCS).

A Tabela 22 resume os principais resultados de estudos recentes sobre processos em desenvolvimento para produção de bioetanol por hidrólise, mas deve-se observar que as previsões de disponibilidade apresentadas na última coluna foram efetuadas, naturalmente, na época dos estudos comentados. Nessa tabela, os rendimentos se referem à produção de bioetanol por tonelada de biomassa seca. O custo dessa biomassa, apresentado na mesma tabela, informa o valor adotado para o cálculo do custo do bioetanol, sendo definido de forma exógena ao processo produtivo.

Independentemente da rota tecnológica, é importante notar o enorme peso que o custo da biomassa tem sobre o custo final do bioetanol. Em geral, nas estimativas feitas para os países do hemisfério norte, o custo da biomassa representa cerca de 40% do custo do bioetanol, e grande parte das reduções do custo do biocombustível para o futuro se baseia na redução do valor da biomassa. Evidentemente, isso cria grandes expectativas quando se considera o caso de outras regiões do planeta, para as quais existem opções de biomassa com custos bem mais baixos. Um exemplo é a biomassa da cana no Brasil, cuja palha apresenta um custo inicialmente avaliado em cerca 1 US$/GJ [Hassuani et al. (2005)], enquanto o bagaço tem custo zero, referindo-se aos fatores de produção. Naturalmente, considerando usos alternativos, o bagaço pode ser bem valorizado na produção de energia elétrica, como comentado no capítulo anterior.

No Brasil, a tecnologia de hidrólise também tem sido desenvolvida, com pesquisas aplicadas em um estágio avançado. Há alguns anos, em um projeto envolvendo a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), a Dedini Indústrias de Base vem testando em escala-piloto um processo para a produção de bioetanol com base no bagaço e, eventualmente, palha de cana, por meio de um tratamento

Organosolv combinado com a hidrólise com ácido diluído. No âmbito desse projeto, está em operação uma unidade de 5 mil litros de bioetanol de capacidade diária, instalada em uma usina de açúcar e bioetanol, visando à determinação de parâmetros de engenharia de processos para o dimensionamento de unidades de maior porte [Dedini (2008)].

Tabela 22 **– Comparação das estimativas de rendimentos e custos para produção de bioetanol por meio da hidrólise**

Referência	Processo	Rendimento (litro/t)	Custo da biomassa	Custo do etanol	Disponibilidade
Hamelinck et al. (2005)	SSF com pré-tratamento com ácido diluído	~300	3 €/GJ	0,98 €/litro	Curto prazo
	SSCF com pré-tratamento com explosão de vapor	~340	2,5 €/GJ	0,58 €/litro	Médio prazo
	CBP com termoidrólise	~400	2 €/GJ	0,39 €/litro	Longo prazo
Aden et al. (2002)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	374	33 US$/t	0,28 US$/litro (mínimo preço)	Curto prazo
Wooley et al. (1999)	SSCF com pré-tratamento com ácido diluído	283	44 US$/t	0,38 US$/litro	Curto prazo
	Idem	413	28 US$/t	0,20 US$/litro	Longo prazo

Fonte: Seabra (2008).

Nesse processo, patenteado como DHR (Dedini Hidrólise Rápida), o solvente (etanol) desestrutura a matriz celulose-hemicelulose-lignina, dissolvendo a lignina, hidrolisando a hemicelulose e expondo a celulose para a ação de ácido sulfúrico diluído, que promove rapidamente (10 a 15 minutos) a hidrólise dessa fração, sob temperaturas de 170º a 190º C e pressões da ordem de 25 bar. Trata-se de um processo contínuo, que vem operando desde 2003 de modo uniforme e estável. Embora ainda haja pontos a aperfeiçoar, já foram superados desafios complexos, como a alimentação contínua de bagaço em reatores sob pressão elevada e a seleção de materiais compatíveis com as altas solicitações mecânicas em ambientes muito corrosivos. Como, nesse processo, a fração das pentoses não é aproveitada, os rendimentos são relativamente baixos, da ordem de 218 litros de bioetanol por tonelada de bagaço seco, mas, futuramente, espera-se atingir níveis próximos de 360 litros por tonelada de bagaço, na medida em que essa fração de açúcares venha a ser utilizada [Rossell e Olivério (2004)].

Planta-piloto da Dedini para a produção de etanol com base no bagaço.

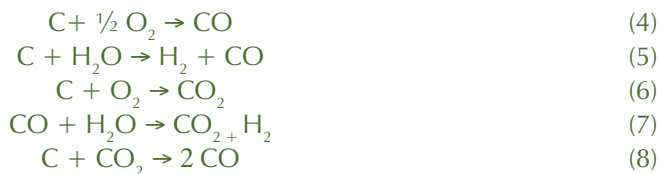
Mais recentemente, a Petrobras tomou a iniciativa de instalar no Cenpes, seu Centro de Pesquisas no Rio de Janeiro, um reator para hidrólise enzimática e, por iniciativa do Ministério de Ciência e Tecnologia, outra plataforma para hidrólise enzimática de bagaço de cana em escala-piloto está sendo implementada em Campinas (SP) junto ao recém-criado Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. Essa plataforma dá seqüência a um projeto em escala de laboratório, envolvendo 20 unidades de pesquisa no Brasil com parcerias no exterior e uma centena de pesquisadores de universidades e centros de pesquisa brasileiros.

De forma geral, pode-se dizer que muito já foi alcançado no desenvolvimento da tecnologia de hidrólise, mas ainda restam importantes desafios a serem enfrentados para a efetiva implementação de unidades comerciais e competitivas por meio desse processo. Como os recursos disponíveis são limitados, é essencial avaliar quais são os itens realmente vitais para a consolidação da tecnologia. Nesse sentido, nos últimos anos foram desenvolvidas linhagens de microrganismos adaptados, assim como foram modeladas e otimizadas as principais operações envolvidas no processo, mas, basicamente, ainda na escala reduzida de reatores experimentais, em que os controles de temperatura e as condições de assepsia são mais fáceis. Apesar de não haver consenso sobre qual seria a melhor opção tecnológica para a produção do bioetanol por essas rotas inovadoras, ao redor do mundo os pesquisadores clamam pela construção das primeiras plantas comerciais, permitindo, assim, que sejam obtidos os tão esperados ganhos pelo aprendizado [Lynd et al. (2005), Zacchi (2007) e Wyman (2007)].

5.2 Gaseificação para produção de combustíveis e eletricidade

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica da biomassa, realizado a elevadas temperaturas, em que as substâncias orgânicas (sólidas ou líquidas) são convertidas em produtos gasosos, principalmente CO, H_2, CO_2 e vapor d´água, observando-se também a formação de hidrocarbonetos leves e outros compostos voláteis e condensáveis como produtos secundários [Grabowski (2004)]. Os constituintes inorgânicos da biomassa são descarregados na forma de cinzas. O processo pode ser efetuado mediante a reação do material orgânico com o oxigênio do ar ou do vapor, ou ainda com oxigênio puro, podendo ser utilizados reatores a pressão atmosférica ou pressurizados. O aquecimento do gaseificador pode ser feito de maneira direta, pela oxidação parcial da biomassa, ou indireta, por meio de mecanismos de troca de calor. Quanto ao projeto do reator, podem ser utilizados gaseificadores de leito fixo, fluidizado ou arrastado. Como se percebe, a gaseificação apresenta rotas bastante diversificadas, que devem ser escolhidas em função da biomassa a ser processada, do tipo de produto buscado e da escala da unidade.

As reações que ocorrem em um gaseificador são bastante complexas e, de seu adequado desenvolvimento, depende a eficiência do processo. Para dar uma idéia simplificada do processo de gaseificação, em seguida à volatilização do combustível sólido, ocorrem ao mesmo tempo as seguintes reações [Rauch (2002)]:

$$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO \quad (4)$$
$$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO \quad (5)$$
$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (6)$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (7)$$
$$C + CO_2 \rightarrow 2\,CO \quad (8)$$

Através da gaseificação, é possível transformar um material heterogêneo, como é o caso da biomassa, em um combustível gasoso apropriado para diversas aplicações. Para alguns usos, contudo, esse gás precisa ser devidamente limpo para se adequar aos padrões exigidos da sua aplicação no uso final. A limpeza pode ocorrer a baixa temperatura, por exemplo, por meio de filtragem (que ocorre em torno de 200° C) e lavagem, para remoção de particulados e condensáveis, após prévio resfriamento. A limpeza também pode ser realizada a média-alta temperatura (350°-400° C), para sua utilização em turbinas a gás e células a combustível. Em geral, essa limpeza a quente é feita com emprego de filtros cerâmicos [Macedo et al. (2006)].

A gaseificação da biomassa vem sendo desenvolvida desde a década de 1940, o que levou à criação de diferentes tipos de gaseificadores, arranjos de processo e aplicações. Como produtos, há desde pequenos sistemas para suprimento de gás para motores automotivos de combustão interna a pequenas aplicações estacionárias de produção combinada de calor e potência (CHP). Além disso, também se tem buscado desenvolver sistemas de maior escala para geração de potência com turbinas a gás, entre 10 MW e 100 MW térmicos, e, mais re-

centemente, sistemas que geram gás limpo para a síntese de combustíveis líquidos (metanol, líquidos por Fischer-Tropsch, bioetanol, DME etc.).

No âmbito dessa tecnologia, muitas das necessidades de desenvolvimento já foram identificadas e, parcialmente, equacionadas na década de 1990, tais como a adequação da alimentação de biomassa "solta" em larga escala em reatores pressurizados, o desenvolvimento de sistemas de limpeza do gás para atender à qualidade requerida e outras necessidades específicas relacionadas aos processos posteriores de utilização do gás produzido, como em turbinas a gás para gases de baixo poder calorífico e em reatores de síntese para o gás de biomassa, utilizados para produção de líquidos. A síntese de combustíveis pode ser beneficiada pela experiência da indústria de combustíveis fósseis, mas a maior complexidade do processo associado ainda demanda mais desenvolvimento.

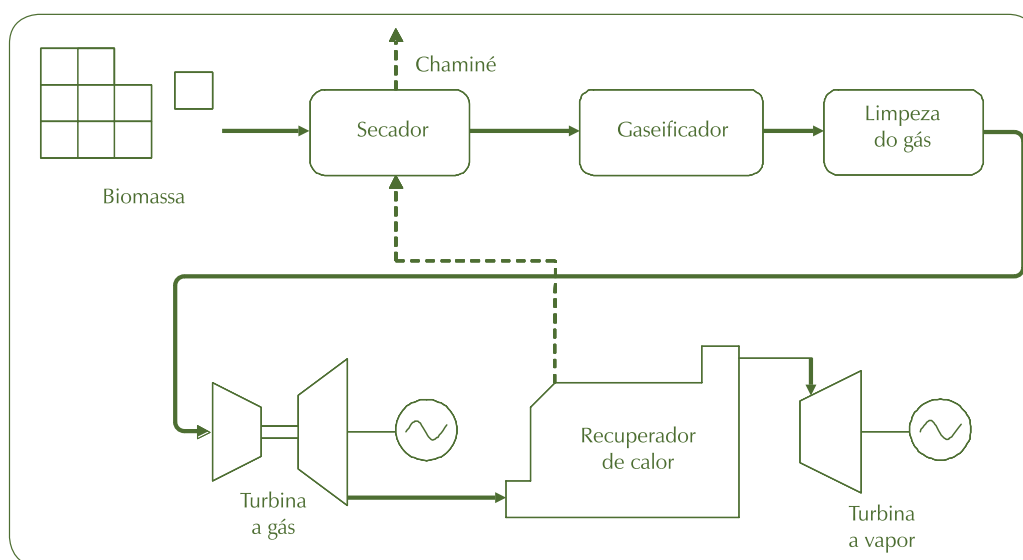
A perspectiva é de que a gaseificação da biomassa possa viabilizar tanto a produção de biocombustíveis líquidos, principalmente para usos automotivos, quanto a geração de bioeletricidade em larga escala, como se apresenta nos próximos parágrafos. O principal fator que impulsiona esse desenvolvimento tecnológico é a necessidade de redução das emissões dos gases de efeito estufa e de substituição do consumo de derivados de petróleo. Apesar da prévia experiência com algumas plantas de demonstração, os esforços de pesquisa e desenvolvimento não têm sido constantes ao longo dos anos, e por isso se espera que essas tecnologias venham a se tornar opções comercialmente maduras somente a médio-longo prazo, ou seja, em mais de dez anos. Mas, para que isso venha a acontecer, ainda é necessário muito empenho no campo da pesquisa e do desenvolvimento, assim como a definição e a implementação de políticas de fomento adequadas.

Gaseificação da biomassa integrada a ciclos combinados (tecnologia BIG/GT-CC)

A gaseificação é considerada uma tecnologia crucial para facilitar a conversão eficiente, limpa e de baixo custo da biomassa em bioeletricidade. Essa tecnologia permite implementar o uso de biomassa nas turbinas a gás, em cujo ciclo térmico de potência os fluidos de trabalho operam a temperaturas médias bem mais elevadas (acima de 1.200° C) do que nos ciclos convencionais a vapor (abaixo de 600° C), o que reduz as perdas termodinâmicas e maximiza o desempenho. Nesse sentido, espera-se que a tecnologia de gaseificação da biomassa integrada a ciclos combinados de turbinas a gás/turbinas a vapor (*biomass integrated gasification/ gas turbine combined cycle* – BIG/GT-CC) seja capaz de viabilizar-se e abrir um amplo campo para a aplicação da biomassa sólida na geração de energia elétrica. No caso dos gaseificadores, menores volumes de gás devem ser limpos, quando comparados com a combustão direta da biomassa, e as turbinas a gás, associadas a ciclos a vapor (ciclo combinado), oferecem alta eficiência na geração elétrica com baixos custos específicos de capital.

O conceito básico da tecnologia BIG/GT-CC envolve o pré-tratamento da biomassa, seguido por gaseificação, resfriamento e limpeza do gás e sua combustão numa turbina. Através de um recuperador de calor, os gases quentes que deixam a turbina a gás geram vapor, que é utili-

zado em um ciclo a vapor para a geração de mais eletricidade. Além disso, após serem utilizados para a produção de vapor, os gases de exaustão a baixa temperatura ainda podem ser usados na secagem da biomassa, tornando a integração do sistema completa [Faaij et al. (1998)]. A Figura 20 mostra uma representação esquemática básica para um sistema BIG/GT-CC.

Figura 20 **– Representação esquemática de um sistema BIG/GT-CC**

Fonte: Elaborado com base em Larson et al (2001).

Aplicando o conceito básico de gaseificar biomassa e utilizar o gás em turbinas a gás, existem três variantes que podem ser utilizadas, cujas principais diferenças estão relacionadas ao projeto do gaseificador. Uma vertente se baseia na tecnologia de leito fluidizado circulante (*circulating fluidized bed* – CFB), com operação do gaseificador à pressão atmosférica e com injeção de ar para fornecimento do oxigênio necessário às reações de gaseificação. Com uma boa experiência acumulada na gaseificação de biomassa segundo essa tecnologia, a empresa sueca TPS – Termiska Processer AB propõe para os sistemas BIG/GT-CC a inserção de um reator imediatamente a jusante do gaseificador, para o craqueamento do alcatrão, substância que provoca dificuldade nos sistemas de limpeza dos gases. A segunda variante baseia-se em um gaseificador com aquecimento indireto e que opera a pressões próximas da pressão atmosférica. Nesse caso, o projeto de maior destaque relativo à gaseificação é o do Battelle Columbus Laboratory (BCL), nos Estados Unidos, no qual se utiliza areia para viabilizar o aquecimento da matéria orgânica. A terceira variante envolve a tecnologia de gaseificação em leito fluidizado circulante, mas operando a altas pressões (20-30 bar, 900°-1.000° C). A empresa americana Foster Wheeler e a finlandesa Carbona obtiveram destaque com essa tecnologia [Consonni e Larson (1996) e Larson et al. (2001)].

Quanto aos rendimentos, diversos estudos vêm sendo publicados ao longo dos anos na tentativa de estimar a eficiência e os custos da bioeletricidade, considerando que todos os problemas tecnológicos seriam resolvidos. Entretanto, existem ainda relevantes barreiras a serem vencidas, como: alimentação e operação de gaseificadores pressurizados de grande capacidade; limpeza do gás com craqueamento completo do alcatrão; separação de álcalis e particulados do gás produzido; modificação das turbinas a gás para uso de gás com baixo poder calorífico, para obter uma *performance* equivalente às turbinas com queima de gás natural e significativa redução do custo de capital por meio do efeito de aprendizado. Nesse ponto, estima-se que a eficiência para a geração de energia elétrica deverá situar-se em torno de 45%, para custos da energia elétrica produzida na faixa de 50 US$/MWh a 60 US$/MWh, como mostrado na Tabela 23, dependendo do custo da biomassa e da opção de gaseificação utilizada [Jin et al. (2006)].

***Tabela 23* – Comparação das estimativas de rendimento e custos dos sistemas BIG/GT-CC**

Referência	Tecnologia de gaseificação	Eficiência relativa ao PCi	Investimento (US$/kW)	Custo da biomassa (US$/GJ)	Custo da energia elétrica (US$/MWh)
Jin et al. (2006)	Atmosférica com aquecimento indireto	43,8%	968	3,0	55
	Pressurizada com injeção de oxigênio	45%	1.059	3,0	52
Faaij et al.* (1998)	CFB pressurizada	54%	1.950	4,0	80
Consonni e Larson (1996)	Atmosférica com aquecimento direto	41,9%	1.500	2,0	49

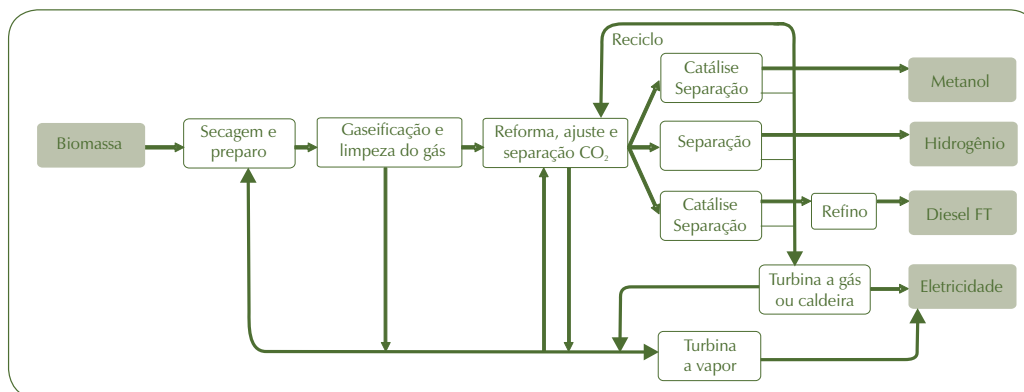
Fonte: Adaptada de Seabra (2008).
* Os valores originais em florins holandeses foram convertidos com a taxa US$ 1,00 = Dfl 2,00.

Nos últimos 15 anos, tem havido considerável esforço de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias para gaseificação da biomassa associadas ao uso de turbinas a gás. Entretanto, apesar de vários projetos terem sido considerados nesse período, apenas uma instalação foi efetivamente construída e operou por tempo significativo, em Värnamo, na Suécia, utilizando a tecnologia da TPS. Um dos projetos, por sinal, deveria ter sido viabilizado no Brasil, com a construção de um sistema BIG/GT-CC de 30-32 MW de potência elétrica, no interior da Bahia, utilizando madeira de eucalipto como combustível, mas que não chegou a ser instalado. A alternativa mais plausível, embora ainda bastante improvável, seria a utilização de sistemas BIG-CC integrados com usinas de açúcar e bioetanol, já que o baixo custo da biomassa favoreceria a viabilidade do processo. Essa alternativa tem sido investigada desde 1997

pelo então Centro de Tecnologia da Copersucar (hoje, Centro de Tecnologia Canavieira), em parceria com a TPS. Mas, no momento, existem apenas especulações sobre a possibilidade da construção de uma unidade de demonstração numa futura continuação do projeto [Hassuani et al. (2005)].

Síntese de combustíveis

Diversos biocombustíveis, como os denominados líquidos Fischer-Tropsch (gasolina FT e diesel FT), hidrogênio, metanol, etanol e DME (dimetil éter), podem ser obtidos de gás de síntese produzido com biomassa. Nesse processo, a gaseificação da biomassa dá origem ao gás de síntese, o qual deve passar pelos processos de limpeza, reforma e, se necessário, ajuste de composição, para, então, ser transformado em combustível em um reator próprio. Como nem todo o gás é convertido em combustível, existe a possibilidade de recircular essa parte não-convertida (para a máxima produção de combustível) ou, simplesmente, queimá-la para a produção de energia elétrica (em um sistema BIG/GT-CC, por exemplo). Essa última opção é conhecida pelo termo *once-through* e é considerada a mais econômica para os casos em que a eletricidade pode ser vendida [Hamelinck et al. (2001), Hamelinck et al. (2003) e Larson et al. (2005)]. A Figura 21 apresenta um diagrama geral para a produção de alguns combustíveis.

Figura 21 **– Fluxograma geral para produção de metanol, hidrogênio e diesel via gaseificação de biomassa (Fischer-Tropsch)**

Fonte: Elaborado com base em Hamelinck (2004).

Na produção de combustíveis líquidos por essa tecnologia, a escala de produção é fator determinante da economicidade do processo, razão pela qual a tecnologia de gaseificação CFB pressurizada é preferível, segundo alguns autores [Hamelinck et al. (2003), Larson et al. (2005) e Hamelinck et al. (2001)]. A gaseificação deve ocorrer de forma que o gás produzido seja rico em CO e H_2, que são os principais reagentes para a produção dos combustíveis

líquidos. A injeção de ar deve ser evitada, já que não é desejável que o gás produzido esteja diluído em nitrogênio.

Como o gás produzido pode conter quantidades consideráveis de metano e outros hidrocarbonetos leves, uma opção é realizar a reforma, que consiste na conversão desses compostos, a alta temperatura e na presença de um catalisador (geralmente, níquel), em CO e H_2. Outro ponto importante é a relação H_2/CO, que deve ser ajustada para cada tipo de biocombustível, com menos hidrogênio para os combustíveis mais pesados, como o diesel. Esse ajuste é feito pela reação de mudança água-gás, desenvolvida na presença de um catalisador à base de ferro [Van der Laan (1999)]:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (9)$$

As reações básicas envolvidas na produção de cada combustível são as seguintes [Larson et al. (2005)]:

para Líquidos Fischer-Tropsch: $CO + 2H_2 \Leftrightarrow CH_2 + H_2O$ (10)

para DME (dimetil éter): $3CO + 3H_2 \Leftrightarrow CH_3OCH_3 + CO_2$ (11)

para metanol: $CO+2H_2 \Leftrightarrow CH_3OH$ (12)

Quanto aos reatores, existem três concepções básicas [Larson et al. (2005)]: leito fixo (fase gasosa), leito fluidizado (fase gasosa) e leito de lama (fase líquida). O primeiro conceito proporciona baixas conversões com apenas uma passagem e ainda é de difícil remoção de calor. Já o segundo possibilita conversões maiores, mas apresenta uma operação mais complexa, enquanto o último é o que apresenta as mais altas conversões para processos com passagem simples.

Atualmente, tem-se observado um desenvolvimento acentuado dessa tecnologia, sobretudo na Europa, com a construção e a operação de projetos de demonstração e, inclusive, alguns comerciais. Nos últimos anos, com base na experiência com gaseificadores de biomassa e na indústria petrolífera de síntese, análises têm sido feitas para avaliar as possibilidades e os custos desses biocombustíveis no futuro. Para o caso de líquidos FT (gasolina e diesel), por exemplo, estima-se que, se todos os problemas tecnológicos estiverem resolvidos, as eficiências globais possam ultrapassar 57%, considerando a produção combinada de combustíveis (34% de eficiência) e eletricidade (23% de eficiência). O custo do biocombustível seria de pouco mais de 15 US$/GJ, para um custo de biomassa de 50 US$/t e investimento pouco superior a 1.770 US$/kW de combustível produzido [Larson et al. (2006)]. Para efeito de comparação, o custo do diesel convencional é de cerca de 7 US$/GJ, com o barril de petróleo a US$ 30 [Macedo (2005b)]. A Tabela 24 apresenta alguns valores da literatura com rendimentos e custos de biocombustíveis líquidos produzidos mediante processos de síntese associados a gaseificadores de biomassa.

Tabela 24 **– Comparação dos rendimentos e custos para a produção de combustíveis de síntese**

Referência	Combustível	Rendimento (litro/t seca)	Investimento	Custo da biomassa	Custo do combustível
Phillips et al. (2007)	Etanol	303	0,82 US$/litro/ano	35 US$/t	0,26 US$/litro
Larson et al. (2006)	Líquidos FT	138	1.774 US$/kW$_{comb, PCI}$	50 US$/t	15,3 US$/GJ$_{PCI}$
	DME	468	1.274 US$/kW$_{comb, PCI}$	50 US$/t	13,8 US$/GJ$_{PCI}$
Hamelinck et al. (2002)	Metanol	280-630	930-2.200 US$/kW$_{comb, PCS}$	2 US$/GJ	8,6-12,2 US$/GJ$_{PCS}$

Fonte: Seabra (2008).

Como comentado anteriormente, a preocupação com as emissões de GEE e os custos do petróleo vêm induzindo as pesquisas por formas alternativas de produzir combustíveis líquidos com base na biomassa, com o menor uso possível de energia fóssil e, até mesmo, utilizando o seqüestro do carbono emitido. Outra proposta recente [Williams et al. (2005)] é o uso da gaseificação da biomassa junto com o carvão em um sistema "híbrido", no qual a biomassa seria utilizada em nível suficiente para reduzir de modo significativo as emissões de GEE do ciclo térmico.

As análises para todos os sistemas bioenergéticos inovadores utilizando gaseificadores mostraram que valorizar seu potencial para mitigar a mudança climática seria essencial para promover a viabilidade econômica, assumindo os preços do barril de petróleo a US$ 30. Entretanto, os elevados valores do petróleo observados nos últimos anos, combinados com um esforço maior no desenvolvimento e na demonstração dessa tecnologia, podem conduzir a sistemas comerciais em menor tempo.

Além das rotas da hidrólise e da gaseificação apresentadas nos parágrafos anteriores, razoavelmente conhecidas e com crescentes perspectivas de alcançar a viabilidade econômica em médio prazo, têm surgido outras possibilidades que, confirmada sua factibilidade técnica em escalas comerciais de produção, também poderão abrir, em médio prazo, novas fronteiras para a utilização energética da cana-de-açúcar. Entre essas linhas ainda em estudo, pode ser citada a produção de butanol (C_4H_8O), atualmente fabricado em plantas petroquímicas e com amplo uso como solvente industrial, mediante rotas bioquímicas utilizando materiais lignocelulósicos como matéria-prima, para uso como aditivo à gasolina, em teores elevados e pouco afetando o consumo específico [DuPont (2008)]. Outra rota, recentemente sugerida, é a produção de biodiesel por meio de processos bioquímicos com base em açúcares como substrato, até mesmo com a apresentação de projetos para a implementação de unidades industriais envolvendo a empresa detentora da tecnologia e empresas brasileiras [Amyris (2008)]. Certamente, essas são possibilidades interessantes e com um significativo volume de tecnologia aplicado, embora ainda esteja por ser demonstrada sua viabilidade econômica e se conheça pouco do desempenho dos processos e dos custos fixos e variáveis envolvidos.

5.3 Uso de bioetanol como insumo petroquímico ou alcoolquímico

Com uma ampla gama de tipos e aplicações, os materiais plásticos – termo que designa, genericamente, uma diversificada família de polímeros artificiais – têm um papel fundamental na nossa vida moderna, seja substituindo materiais tradicionais, como vidro e madeira, seja atendendo a novos usos no campo das embalagens, materiais de revestimento e materiais estruturais, entre tantas possibilidades. Para atender esse mercado, a indústria petroquímica convencional utiliza essencialmente gás natural e nafta de petróleo como insumos, para, por meio de reações complexas, sintetizar seus produtos em processos agrupados em três categorias: a) as indústrias de primeira geração, que fornecem os produtos petroquímicos básicos, tais como eteno (ou etileno, C_2H_4), propeno (ou propileno, C_3H_6) e butadieno; b) as indústrias de segunda geração, que transformam os petroquímicos básicos nos chamados petroquímicos finais, como polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliésteres e óxido de etileno; e c) as indústrias de terceira geração, em que os produtos finais são quimicamente modificados ou conformados em produtos de consumo, como filmes, recipientes e objetos.

O bioetanol é uma substância homogênea e reativa, que pode ser utilizada como insumo em diversos processos tradicionalmente petroquímicos, que nesse caso poderiam ser denominados alcoolquímicos. Os principais processos utilizados na transformação do bioetanol podem ser classificados conforme indicado na Tabela 25, destacando-se a produção de eteno como resultado da desidratação do bioetanol, precursor de uma ampla gama de produtos de segunda geração, como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o policloreto de vinila (PVC). Com base na equação de desidratação do bioetanol e assumindo uma eficiência de conversão de 95%, tem-se um consumo específico de 1,73 kg ou 2,18 litros de bioetanol por kg de eteno.

Mediante a desidrogenação do bioetanol para acetaldeído, consegue-se obter outra classe de intermediários de grande interesse, butadieno e polibutadieno, componentes básicos das borrachas sintéticas utilizadas para diversas aplicações, inclusive pneus. Praticamente todos os produtos listados na Tabela 25 são de uso difundido nos setores industrial (tintas, solventes e adesivos), agrícola (fertilizantes e defensivos) e uso final (por exemplo, em fibras têxteis). O bioetanol pode ser considerado uma matéria-prima para a obtenção de uma ampla gama de produtos tradicionalmente petroquímicos, a partir de sua conversão mediante processos de primeira ou segunda geração.

Tabela 25 – **Processos básicos da indústria alcoolquímica**

Processos	Principais produtos	Aplicação típica
Desidratação	Eteno Propeno Etilenoglicol	Resinas plásticas Solventes Éter etílico Fibras têxteis
Desidrogenação Oxigenação	Acetaldeído	Ácido acético Acetatos Corantes
Esterificação	Acetatos Acrilatos	Solventes Fibras têxteis Adesivos
Halogenação	Cloreto de etila	Fluidos refrigerantes Produtos medicinais Resinas plásticas
Amonólise	Dietilamina Monoetilamina	Inseticidas Herbicidas
Desidrogenação Desidratação	Butadieno	Borrachas sintéticas

Fonte: Elaborado com base em Schuchardt (2001).

Os mercados para esses usos de bioetanol são significativos. Estima-se que a demanda de bioetanol como insumo para a indústria química e petroquímica brasileira possa alcançar 7 milhões de metros cúbicos [Apla (2006)], cerca de um terço da produção observada na safra 2006/2007. Como a produção desses setores no Brasil representa cerca de 3% da produção mundial, é evidente que há um grande potencial para a expansão do emprego do bioetanol de cana-de-açúcar como matéria-prima em uma escala global. Considerando apenas a demanda mundial de etileno em 2005, de 105 milhões de toneladas [CMAI (2005)], e uma penetração de 10% do bioetanol em substituição a outros insumos, tem-se um requerimento de 23 bilhões de litros, da mesma ordem de magnitude que a atual produção brasileira. O fator decisivo para o desenvolvimento desse mercado é o preço relativo do bioetanol frente aos demais insumos, já que as tecnologias básicas estão dominadas.

Primeiros passos da etanolquímica no Brasil

Durante a década de 1980, projetos que implementavam o uso de etanol em substituição a matérias-primas fósseis na indústria petroquímica brasileira foram conduzidos com sucesso na Oxiteno e na Companhia Pernambucana de Borrachas (Coperbo). Estima-se que, nesse período, o consumo de bioetanol como matéria-prima foi de 500 milhões de litros anuais [Pádua Rodrigues (2005)]. Essas rotas produtivas foram descontinuadas a partir de 1985 por causa da configuração desfavorável de preços, mas, atualmente, considerando o elevado custo dos insumos fósseis, voltam a apresentar interesse. No caso da Oxiteno, braço petroquímico do Grupo Ultrapar, o bioetanol de cana foi utilizado como matéria-prima em sua unidade de Camaçari, na Bahia, na primeira metade dos anos 1980, para uma produção anual de etileno estimada em 230 mil toneladas. Na atualidade, essa empresa aplica recursos próprios expressivos no desenvolvimento de tecnologia de processos petroquímicos e alcoolquímicos, com diversas patentes internacionais registradas, particularmente na produção de catalisadores, componentes essenciais para a conversão do etanol em etileno e outros precursores. Além disso, tem se mobilizado para desenvolver a produção de etanol por hidrólise da celulose e implementar biorrefinarias, reconhecendo seu interesse no suprimento de matéria-prima para suas unidades de produção de etileno e etilenoglicol [Inovação Unicamp (2006) e BNDES (2007)].

A Coperbo tem uma história mais longa entre o bioetanol e a produção de insumos químicos. Em setembro de 1965, essa empresa pôs em produção uma unidade de butadieno em Cabo (PE), para fabricar 27,5 mil toneladas anuais de borrachas sintéticas com base no etanol, para atender à crescente demanda desse elastômero, apenas parcialmente suprida pela produção nacional de borracha natural. Entretanto, com a liberação da exportação de melaços e da importação de borracha natural pelo governo da época, faltou etanol para a produção de borracha, trazendo dificuldades para a operação da empresa. Em 1971, o controle acionário da Coperbo foi transferido à Petroquisa, o que melhorou sua condição financeira e lhe deu novo impulso com o incremento da produção de etanol a partir de 1975. Incluíam-se na linha de produtos o ácido acético e o acetato de vinila, componentes que terminaram justificando a criação da Companhia Alcooquímica Nacional, posteriormente controlada pela Union Carbide, empresa atualmente sob comando da Dow Chemical [Jornal do Commercio (1999)]. Não foram obtidos mais detalhes sobre seu atual processo industrial, mas é fato que essa empresa, durante alguns anos, produziu butadieno, usado principalmente na fabricação de pneus, em escala comercial, com base no etanol.

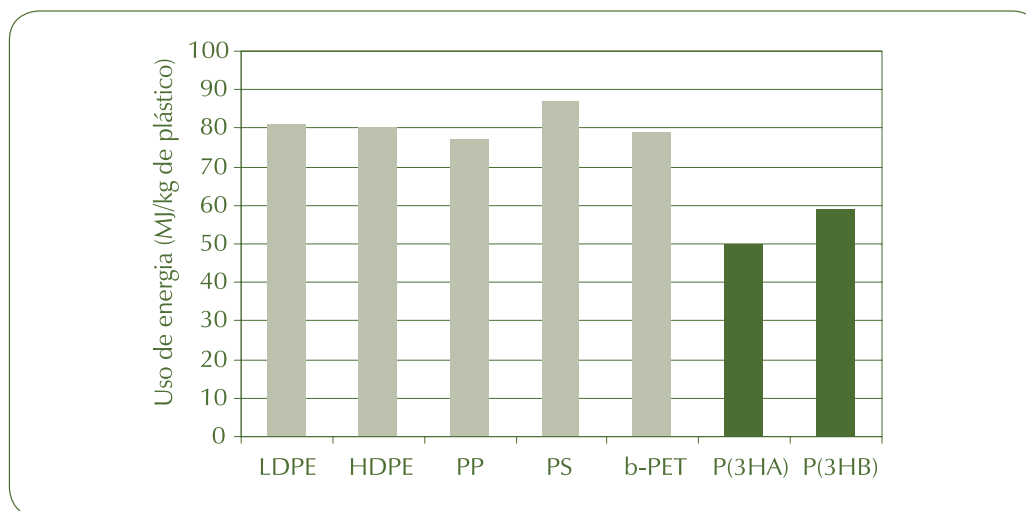
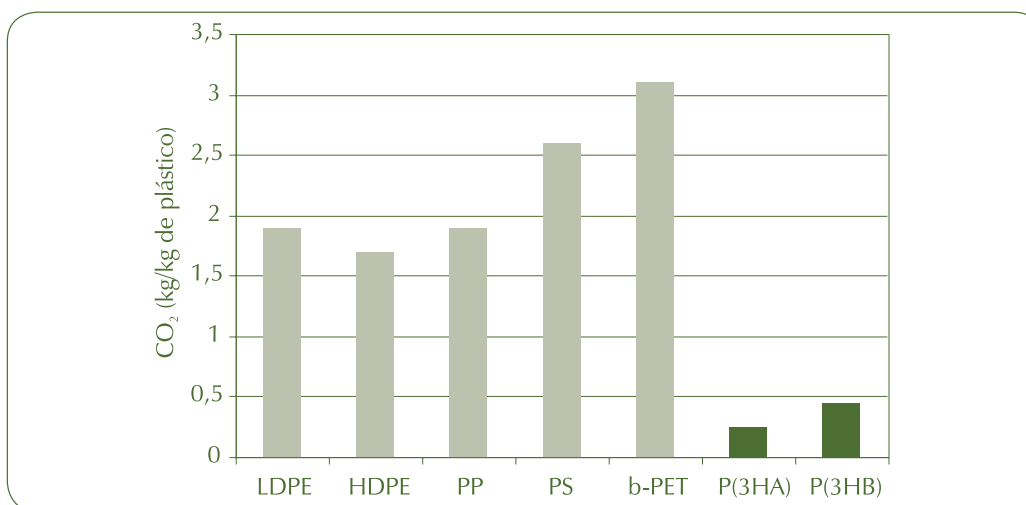
5.4 Produção de plásticos biodegradáveis

Em 2004, a produção mundial de plásticos foi de 230 milhões de toneladas e espera-se, para 2010, que esse número salte para quase 300 milhões de toneladas [Dröscher (2006)]. Mas esse enorme mercado em crescimento vem despertando grande preocupação ambiental, já que o rápido descarte e a difícil degradação pelo ambiente têm promovido o crescimento acelerado de resíduos. Após o uso, menos de 10% dos plásticos são reciclados, e a grande maioria é destinada a aterros [Waste-online (2008)], o que vem a exigir da natureza cerca de 100 a 500 anos para a completa degradação.

Além do aumento da reciclagem, outra opção eficaz para contornar esse problema é a utilização dos plásticos biodegradáveis, polímeros que, sob condições apropriadas do meio ambiente, degradam-se completamente pela ação microbiana em um curto espaço de tempo. E no caso dos bioplásticos, ainda existe a importante vantagem de serem produzidos de fontes renováveis, como amido, açúcares ou ácidos graxos. Um exemplo de bioplástico é o ácido poliláctico (PLA), que é composto de monômeros de ácido láctico, obtido pela fermentação microbiana. Outra possibilidade é obter os biopolímeros diretamente dos microrganismos, como é o caso do PHB (poliidroxibutirato), PHA (poliidroxialcanoatos) e de seus derivados; nesses casos, o biopolímero é biossintetizado como material de reserva energética de microrganismos.

O primeiro relato da observação dos bioplásticos foi feito na década de 1920, mas o assunto permaneceu dormente até meados da década de 1970, quando as crises do petróleo estimularam a pesquisa por fontes alternativas de materiais e energia. Atualmente, já são conhecidas tanto as estruturas quanto as rotas biossintéticas e aplicações de muitos bioplásticos, mas ainda existem importantes limitações para a produção em larga escala, como as condições especiais de crescimento requeridas para a síntese desses compostos, a dificuldade de sintetizá-los por meio de precursores de baixo custo e os altos custos da sua recuperação. Mesmo com a utilização de microrganismos recombinantes capazes de fermentar fontes de carbono de baixo custo (e.g. melaço, sacarose, óleos vegetais e metano), esses processos ainda não são competitivos com a produção convencional dos plásticos sintéticos [Luengo et al. (2003)].

Além das questões econômicas, ainda é importante que o balanço energético no ciclo de vida desses biopolímeros seja positivo, uma vez que também são pretendidos como substitutos dos materiais petroquímicos. Normalmente, os ganhos de energia são pequenos, já que o suprimento de energia se baseia, em geral, no uso de combustíveis fósseis. Nesse caso, mais uma vez os materiais derivados da cana levam vantagem, graças ao uso do bagaço. No Gráfico 15, apresenta-se uma comparação para o consumo de energia e as emissões de GEE na produção de diversos plásticos, incluindo materiais de origem fóssil – polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o politereftalato de etila (b-PET) – e dois poliésteres co-poliméricos produzidos com biomassa: P(3HA), com base no óleo de soja, e P(3HB), com base na glicose [Akiyama et al. (2003)].

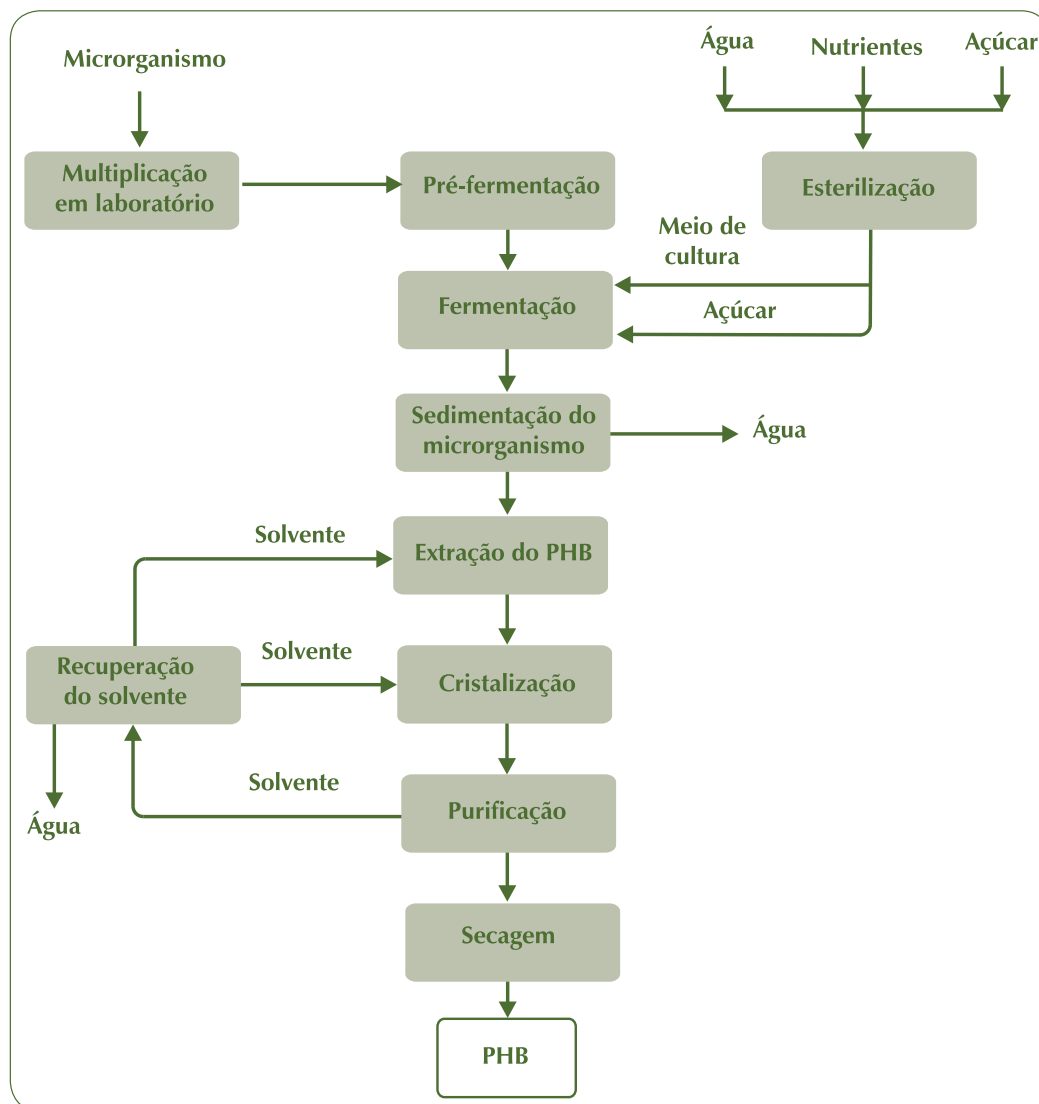
Gráfico 15 **– Uso de energia (a) e emissões de GEE (b) para a produção de plásticos**

(a)

(b)

Fonte: Akiyama et al. (2003).

No Brasil, já existe uma unidade de produção de PHB (poliidroxibutirato) operando em escala-piloto, com capacidade de 60 toneladas anuais. A PHB Industrial S.A., em Serrana (SP), está instalada anexa à Usina da Pedra, unidade produtora de açúcar e bioetanol responsável

pelo fornecimento do açúcar utilizado como matéria-prima e por todo o vapor e energia elétrica demandados pela planta. A produção em escala industrial estava prevista para começar em 2008, iniciando com 10 mil toneladas por ano, destinadas, a princípio, ao mercado externo [Biocycle (2008)]. Nesse processo, apresentado na Figura 22, a fermentação é promovida por microrganismos aerobicamente cultivados em meio composto de açúcar de cana e nutrientes inorgânicos [Nonato et al. (2001)]. Considerando esse esquema de produção, estima-se que apenas 10% de toda a energia consumida no ciclo de vida do PHB seja proveniente de fontes não-renováveis de energia, já que o bagaço garante toda a energia necessária para o processo [Seabra e Macedo (2006)]. Sendo assim, é razoável imaginar desempenhos consideravelmente melhores em termos do uso de energia não-renovável e das emissões de GEE, em comparação aos verificados para os polímeros obtidos de demais fontes.

Planta-piloto da PHB Industrial S.A. para produção de plástico biodegradável com base no açúcar da cana.

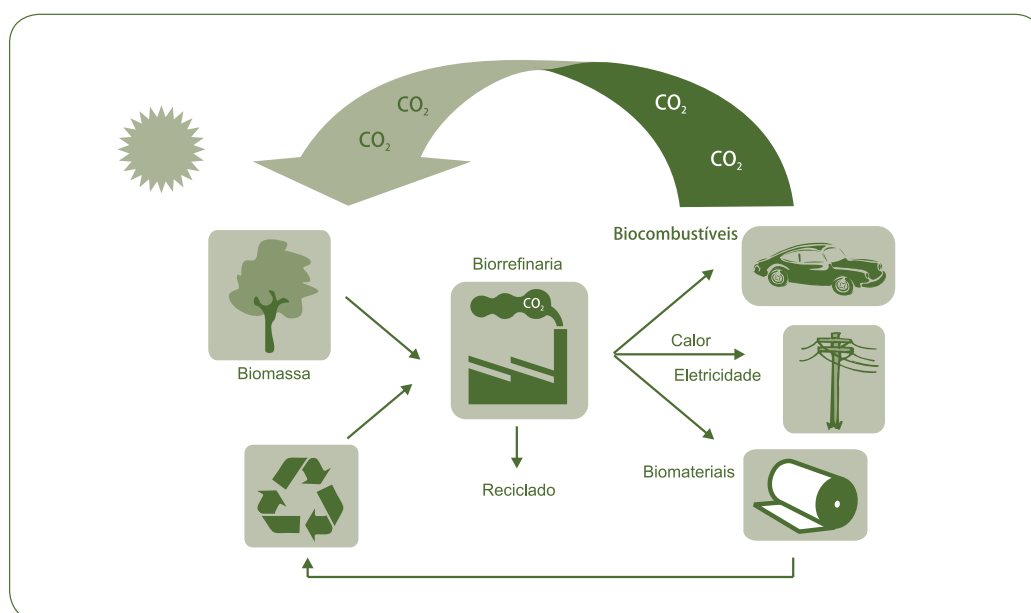
Figura 22 – Diagrama de fluxo da produção de PHB com base no açúcar da cana

Fonte: Nonato (2007).

5.5 Biorrefinaria: múltiplos produtos e uso integral da matéria-prima

Uma biorrefinaria, similiar à sua análoga para o petróleo, pode ser definida como um complexo integrado capaz de produzir diferentes produtos (combustíveis, químicos e eletrici-

dade) com base em diferentes biomassas [Ondrey (2006)], num conceito que permitiria o alcance de maiores eficiências, tanto do ponto de vista termodinâmico quanto do ponto de vista econômico e ambiental. Hoje, a produção de bioetanol da cana-de-açúcar já pode ser considerada um exemplo de biorrefinaria, com a produção combinada de açúcar, bioetanol e alguns outros produtos químicos, assim como potência e calor com base na biomassa residual [Macedo (2005b)].

Figura 23 **– Ciclo integrado completo agri-biocombustível-biomaterial-bioenergia para tecnologias sustentáveis**

CO_2
CO_2
CO_2
CO_2
Biocombustíveis
Biorrefinaria
CO_2
Biomassa
Calor
Eletricidade
Biomateriais
Reciclado

Fonte: Elaborado com base em Ragauskas et al. (2006).

Ragauskas et al. (2006) promovem uma ampla discussão sobre o conceito e as possibilidades envolvendo as biorrefinarias, que, segundo os autores, representam uma opção otimizada para o uso da biomassa na produção sustentável de bioenergia, biocombustíveis e biomateriais, tanto no curto quanto no longo prazo. Por conta dessa característica, grandes investimentos em desenvolvimento têm sido feitos nos últimos anos, tanto pelos governos quanto por grandes empresas do setor privado [Genencor (2004) e Ondrey (2006)], fazendo com que a expectativa por plantas comerciais competitivas não envolva prazos muitos longos.

Algumas análises de "biorrefinarias" hipotéticas têm sido apresentadas, considerando o uso de tecnologias esperadas como "maduras" no futuro. Lynd e colaboradores (2005), com base em materiais lignocelulósicos, consideraram a produção futura auto-suficiente de potência, combustíveis Fischer-Tropsch e hidrogênio, assim como cenários de co-produção envolven-

do bioetanol-potência, bioetanol-potência-combustíveis FT, bioetanol-hidrogênio ou outras combinações de produtos em conjunto com a produção de proteína. Para essa análise, alguns cenários mostraram eficiência energética global da ordem de 70% e competitividade econômica com processos convencionais já baseados em preços de combustíveis fósseis dos últimos anos.

Um processo similar de diversificação produtiva e valorização de subprodutos está em curso nas indústrias de base florestal, o qual contempla a produção de papel e celulose, energia e uma diversidade de produtos químicos, contribuindo para incrementar a eficiência dos processos, melhorar a economicidade e reduzir impactos ambientais [Karlsson (2007)]. Essa agroindústria apresenta perspectivas de crescimento similares às da agroindústria canavieira e certamente serão possíveis sinergias interessantes entre ambas no desenvolvimento de tecnologias e de mercados.

Para isso, as tecnologias-chave são a gaseificação, para a produção do gás de síntese, e a conversão de lignocelulósicos em açúcares [Werpy et al. (2005)]. Ao longo deste capítulo, foi possível perceber o enorme potencial relacionado com a tecnologia da gaseificação, com as possibilidades de produção de energia e diferentes combustíveis. Já para ilustrar o potencial da hidrólise, basta ter em mente que, quando a tecnologia se tornar comercial e competitiva, todos os processos bioquímicos com base no açúcar para a produção de plásticos, ácidos orgânicos e solventes, entre outros, não ficarão mais restritos à indústria de açúcar convencional, mas poderão derivar de outras biomassas.

Capítulo 6

Bioetanol de cana-de-açúcar no Brasil

A história quase secular do uso de bioetanol de cana-de-açúcar como combustível no Brasil oferece perspectivas interessantes, desde a progressiva construção de um arcabouço institucional e a evolução dos parâmetros técnicos agroindustriais, que traçam uma trajetória exemplar de ganhos de produtividade, até a paulatina ampliação dos benefícios ambientais, como a redução da demanda de água e o crescente uso de processos de reciclagem. Nos próximos parágrafos, analisa-se mais detidamente o contexto brasileiro, apresentando-se inicialmente o desenvolvimento histórico do uso de bioetanol como combustível, no qual intervieram diversos visionários e técnicos dedicados, ao mesmo tempo em que se estabeleceu uma base legal e institucional que permitiu que essa alternativa energética se tornasse um componente regular da matriz energética brasileira. Em seguida, apresenta-se o quadro atual da produção de bioetanol no Brasil, descrevendo as características principais do parque produtor e as perspectivas de evolução de seus indicadores de produtividade, baseadas em permanente processo de inovação tecnológica, tema do tópico final, onde se analisa como a pesquisa e o desenvolvimento de métodos, equipamentos e processos permitiram à agroindústria canavieira consolidar-se como fonte sustentável de energia.

6.1 Evolução do bioetanol combustível no Brasil

Em 1903, nas conclusões do I Congresso Nacional sobre Aplicações Industriais do Álcool, já se recomendava a implantação de uma infra-estrutura para produção de bioetanol automotivo no Brasil [Goldemberg et al. (1993)]. Com a criação, em 1920, da Estação Experimental de Combustíveis e Minérios, futuro Instituto Nacional de Tecnologia (INT), foram conduzidos, com bons resultados, diversos testes em veículos movidos a bioetanol (denominado na época álcool-motor), com o objetivo declarado de substituir a gasolina derivada de petróleo, produto que se revelava escasso e tendencialmente caro [Castro e Schwartzman (1981)]. Entre os pioneiros do uso veicular do bioetanol, destacam-se Heraldo de Souza Mattos (que, em 1923, participou de corridas automobilísticas utilizando bioetanol hidratado puro como combustível), Fernando Sabino de Oliveira (autor do livro *O álcool-motor e os motores a explosão*, publicado em 1937) e Lauro de Barros Siciliano (autor de dezenas de estudos técnicos sobre o uso de bioetanol em motores), que conduziram ensaios de bancada e testes em estradas, procurando motivar o governo e empresários [Vargas (1994)].

Veículo Ford adaptado pelo INT em 1925 para demonstrações do uso de bioetanol puro como combustível.

Com base nessas experiências, para reduzir os impactos da total dependência de combustíveis derivados de petróleo e utilizar os excedentes de produção da indústria açucareira, o governo brasileiro determinou, mediante o Decreto 19.717, assinado em 1931 pelo

presidente Getúlio Vargas, a mistura compulsória de, no mínimo, 5% de bioetanol anidro à gasolina, no início apenas para gasolina importada e depois também para a gasolina produzida localmente. Posteriormente, atribuiu-se ao Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) a responsabilidade de estabelecer preços, cotas de produção por usina e percentual de mistura [Brasil (1931)]. Desse modo, o uso do bioetanol como combustível automotivo, conhecido há mais de um século pela indústria automobilística, vem sendo praticado regularmente no Brasil desde 1931, praticamente contemporâneo da introdução dos automóveis como meio de transporte no país.

O teor de bioetanol na gasolina brasileira variou ao longo das décadas sucessivas, situando-se, em média, em 7,5% até 1975, quando os efeitos do primeiro choque do petróleo impuseram a necessidade de expandir o emprego desse biocombustível nos motores. Por conta da elevação dos preços internacionais do petróleo, os gastos com sua importação se expandiram de US$ 600 milhões, em 1973, para US$ 2,5 bilhões, em 1974, provocando um déficit na balança comercial de US$ 4,7 bilhões. Ao longo dos anos seguintes, esses resultados passaram a pesar fortemente na dívida externa brasileira e na escalada da inflação. No atual contexto do mercado energético, com diversos países se voltando para o bioetanol como opção energética, é interessante rever os principais marcos históricos que permitiram consolidar a produção de bioetanol combustível no Brasil.

Ainda na primeira metade da década de 1970, com o objetivo de articular uma resposta à nova situação energética configurada pelo choque do petróleo, envolvendo empresários visionários como Lamartine Navarro Jr. e Cícero Junqueira Franco, desenvolveu-se uma proposta para reduzir a dependência de petróleo importado, combinando a preferência do Instituto do Açúcar e do Álcool pela produção exclusiva de bioetanol direto em destilarias autônomas e o interesse da Copersucar, principal cooperativa de produtores de açúcar, que pretendia aproveitar a capacidade ociosa das destilarias anexas às usinas açucareiras. Um documento com as recomendações das discussões entre o setor privado e o governo, no âmbito dessa proposta, foi entregue ao Conselho Nacional de Petróleo em março de 1974 [Bertelli (2007)].

Outro fato relevante para a definição governamental em favor do incremento do uso de bioetanol foi uma visita do então presidente Ernesto Geisel ao Centro Tecnológico da Aeronáutica, em junho de 1975, quando lhe foram apresentados os trabalhos desenvolvidos pelo professor Urbano Ernesto Stumpf sobre o emprego de bioetanol em motores, utilizando gasolina com maiores teores de bioetanol anidro e ensaiando o uso exclusivo de bioetanol hidratado, em motores adaptados. Nessa oportunidade, ficou claro que o Brasil poderia contar com uma boa solução: pelo lado da oferta, poderia incrementar a produção de bioetanol usando a capacidade ociosa das usinas de açúcar; e pelo lado do consumo, poderia ampliar o teor de bioetanol na gasolina e, eventualmente, utilizar bioetanol puro.

Com base nessas premissas, depois de novos estudos e debates, o governo federal instituiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), mediante o Decreto 76.593, de 14/11/1975,

firmado pelo presidente Geisel. Esse decreto estabeleceu linhas específicas de financiamento, formalizou a criação da Comissão Nacional do Álcool (CNA), responsável pela gestão do programa, e determinou uma paridade de preço entre o bioetanol e o açúcar cristal *standard*, estimulando a produção desse biocombustível, até então um subproduto menos valorizado. Nesse contexto, foram estabelecidas como metas de produção 3 bilhões de litros de bioetanol, para 1980, e 10,7 bilhões de litros, para 1985. Foram também implementados diversos incentivos para expandir a produção e o uso de bioetanol combustível, inicialmente incrementando-se a adição de bioetanol anidro à gasolina. Nos primeiros anos da implementação do Proálcool, foi decisiva a atuação do ministro da Indústria e Comércio, Severo Gomes, que contou com o secretário de Tecnologia Industrial, José Walter Bautista Vidal, para a formatação inicial do programa, e posteriormente, em sua fase de maior expansão a partir de 1979, com o ministro João Camilo Pena, que se mostraram comprometidos com o bioetanol combustível e criaram as bases para sua consolidação. Como uma mensagem dessa geração de pioneiros, o livro *Energia da biomassa – Alavanca de uma nova política industrial* aponta a necessidade de transcender os sistemas energéticos convencionais para a "civilização da fotossíntese" [Guimarães et al. (1986)].

Com um marco legal decididamente favorável ao bioetanol, sua produção se ampliou de modo significativo. Entre 1975 e 1979, a produção de bioetanol (anidro e hidratado) passou de 580 mil m^3 para 3.676 mil m^3, superando em 15% a meta estabelecida para aquele ano. Com o recrudescimento da crise do petróleo, em 1979, quando seus preços sofreram nova elevação, o Proálcool foi intensificado, estimulando-se o uso de bioetanol hidratado em motores adaptados ou especificamente produzidos para o emprego desse biocombustível. Nessa época, a dependência de petróleo importado no Brasil era da ordem de 85%, significando 32% do total das importações brasileiras, com impactos ainda mais graves sobre a economia nacional, o que justificava a meta ambiciosa de produzir 10,7 bilhões de litros de bioetanol em 1985. Com esse objetivo, mediante o Decreto 83.700, de 1979, o governo federal reforçou o suporte à produção alcooleira com a criação do Conselho Nacional do Álcool (CNAL), ao qual coube a condução geral do Proálcool, e da Comissão Executiva Nacional do Álcool (Cenal), responsável pela implementação do programa [CGEE (2007a)]. Em tais condições, a produção de bioetanol atingiu 11,7 bilhões de litros em 1985, excedendo em 8% a meta inicialmente pretendida.

Em síntese, o conjunto de incentivos adotados pelo Proálcool nessa época, que se mostrou efetivamente capaz de motivar os agentes econômicos, incluía: a) definição de níveis mínimos mais altos no teor de bioetanol anidro na gasolina, que foram, progressivamente, elevados até atingirem 25%; b) garantia de um preço ao consumidor para o bioetanol hidratado menor do que o preço da gasolina (nessa época, os preços dos combustíveis, ao longo de toda a cadeia produtiva, eram determinados pelo governo federal); c) garantia de remuneração competitiva para o produtor de bioetanol, mesmo frente a preços internacionais mais atrativos para o açúcar do que para o bioetanol (subsídio de competitividade); d) abertura de linhas de crédito com empréstimos em condições favoráveis para os usineiros incrementarem sua capacidade de produção; e) redução dos impostos (na venda de carros novos e no licencia-

mento anual) para os veículos a bioetanol hidratado; f) estabelecimento da obrigatoriedade de venda de bioetanol hidratado nos postos; e g) manutenção de estoques estratégicos para assegurar o abastecimento na entressafra.

Durante 1985, ocorreu uma reviravolta no cenário, com o início da redução dos preços do petróleo e a recuperação dos preços do açúcar, desmotivando a produção de bioetanol e engendrando um quadro de dificuldades que encerrou a fase de expansão do Proálcool. Em 1986, o governo federal reviu as políticas de fomento, o que reduziu a rentabilidade média da agroindústria canavieira e estimulou ainda mais o uso da matéria-prima disponível para a fabricação de açúcar para exportação. Como um resultado eloqüente da desatenção governamental para com o bioetanol e da ausência de políticas específicas para esse biocombustível, em 1989 os consumidores de bioetanol passaram a enfrentar descontinuidades na oferta de produto. Os mecanismos de formação de estoques de segurança não funcionaram e foram necessárias medidas emergenciais, como a redução do teor de bioetanol na gasolina, a importação de bioetanol e o uso de mesclas de gasolina com metanol como substituto de bioetanol.

Uma conseqüência duradoura dessa crise de abastecimento – justamente de um produto nacional e sobre o qual a propaganda dizia que "pode usar que não vai faltar" – foi a perda da confiança do consumidor brasileiro, que levou, inevitavelmente, à queda das vendas dos carros a bioetanol puro. Assim, após terem significado 85% do total de veículos novos comercializados em 1985, as vendas de veículos a bioetanol encerraram a década com uma participação de apenas 11,4% em 1990 [Scandiffio (2005)]. Somente a partir de meados de 2003, com o lançamento dos veículos flexíveis, o consumo de bioetanol hidratado voltou a crescer de modo expressivo.

É interessante observar que, mesmo nessa época de aparente indefinição sobre o futuro do bioetanol, estudos independentes sugeriam a necessidade de manter o programa em operação. Propunha-se ajustar sua taxa de crescimento ao novo contexto, mas assegurando a continuidade do programa, não somente pelos benefícios ambientais e sociais associados, como também pelos ganhos de produtividade em curso, que faziam o bioetanol competitivo frente ao petróleo a US$ 30 o barril [Serôa da Motta e Ferreira (1988)].

Até o início dos anos 1990, as características estruturais básicas da agroindústria sucroalcooleira no Brasil, resultantes de décadas de rígido controle estatal, eram uma produção agrícola e industrial sob controle das usinas, heterogeneidade produtiva (especialmente na produção da cana), reduzido aproveitamento de subprodutos e competitividade fundamentada, em grande medida, nos baixos salários e na produção extensiva. As diferenças técnicas eram significativas entre as unidades produtivas das regiões Norte-Nordeste e Centro-Sul e, mesmo dentro das regiões, existiam diferenças acentuadas de produtividade e escala de produção [CGEE (2007a)].

No bojo de mudanças administrativas implantadas no começo dos anos 1990, que revisaram o papel do Estado na economia nacional, o governo brasileiro desencadeou o processo de

liberalização e rearranjo institucional do setor sucroalcooleiro, extinguindo o Instituto do Açúcar e do Álcool e passando a gestão dos temas relativos ao bioetanol para a responsabilidade do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (Cima), presidido pelo Ministério da Indústria e Comércio até 1999, quando passou para o Ministério da Agricultura. Com a progressiva retirada dos subsídios e o fim do tabelamento dos preços do bioetanol a partir de 1991, deu-se início ao processo de liberação total de preços para o setor sucroalcooleiro, concluído apenas em 1999. Dessa maneira, passou a operar um novo modelo de relacionamento entre produtores de cana-de-açúcar, produtores de bioetanol e empresas distribuidoras de combustível, no qual prevaleceram as regras de mercado atualmente adotadas no país. Do quadro original de medidas legais e tributárias que permitiram consolidar o bioetanol combustível no Brasil, permanece vigente apenas a tributação diferencial do bioetanol hidratado e dos veículos a bioetanol, que procuram manter em condições aproximadamente paritárias para o consumidor o uso de bioetanol hidratado ou gasolina.

Nesse contexto, os preços do bioetanol anidro ou hidratado se negociam livremente entre os produtores e as distribuidoras. No âmbito da agroindústria, o preço da cana também está liberado, mas tem sido majoritariamente determinado segundo um modelo contratual estabelecido em bases voluntárias e coordenado pelos plantadores de cana e produtores de bioetanol e açúcar. Nesse modelo, o açúcar contido na cana que chega para ser processada, bem como o açúcar e o bioetanol produzidos pelas usinas, são convertidos todos a uma base comum de comparação, os açúcares totais recuperáveis (ATR). Sob tal conceito, a cana é remunerada em função de seu efetivo aporte à produção, medido em ATR presente na matéria-prima entregue à agroindústria, cujo preço é determinado pelo resultado econômico dos produtos obtidos, açúcar e bioetanol, consideradas as vendas para os mercados interno e externo. No âmbito do Estado de São Paulo e regiões vizinhas, esse modelo é gerido pelo Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Consecana), constituído em 1997 e formado por representantes de todos os setores privados envolvidos [Scandiffio (2005)].

Tal processo de rearranjo do papel e da forma de atuação dos agentes econômicos não ocorreu de forma suave e consensual, mas com grandes divergências entre empresários conservadores, que pretendiam manter o aparato intervencionista e suas garantias de mercado e realização de lucros, e outros progressistas, que desejavam um mercado mais liberado, com possibilidades de investimento e obtenção de ganhos por diferenciais de produtividade, grupo que, ao longo do tempo e por força dos avanços alcançados, prevaleceu. Nesse sentido, foi essencial a existência de um marco institucional que balizou e consolidou as transformações implementadas.

Envolvendo a reestruturação institucional no âmbito da agroindústria do bioetanol, por meio da Lei 9.478, de 1997, foram criadas duas instituições importantes: o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), cujas atribuições incluem o estabelecimento de diretrizes para programas específicos de uso dos biocombustíveis, e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), que, mediante a Lei 11.097, de 2005, foi renomeada Agência Nacional do Petróleo, Gás

Natural e Biocombustíveis, ampliando seu campo de atuação. Entre as atribuições da ANP, constam a promoção da regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas dos biocombustíveis, devendo implementar a política nacional de biocombustíveis, com ênfase na garantia de suprimento em todo o território nacional e a proteção dos interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta de produtos. Mais especificamente, são de sua atribuição: fiscalizar e aplicar sanções administrativas e pecuniárias previstas em lei ou contrato; fazer cumprir as boas práticas de conservação e uso racional dos biocombustíveis e de preservação do meio ambiente; organizar e conservar o acervo das informações e dados relativos às atividades reguladas da indústria dos biocombustíveis; e especificar a qualidade dos biocombustíveis. Essa última atribuição é da maior relevância, pressupondo um adequado suporte técnico e o estabelecimento de espaços de interlocução entre produtores de bioetanol, fabricantes de motores e agências ambientais. Como visto no Capítulo 2, a especificação do bioetanol anidro e hidratado para fins combustíveis é definida por uma resolução da ANP.

Encerrou esse processo de revisão institucional para o bioetanol a constituição, pelo governo federal, do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA), por meio do Decreto 3.546, de 2000. Essa entidade tem por objetivo deliberar sobre as políticas relacionadas com as atividades do setor sucroalcooleiro, considerando, entre outros, os seguintes aspectos: a) uma adequada participação dos produtos de cana-de-açúcar na matriz energética nacional; b) os mecanismos econômicos necessários à auto-sustentação setorial; e c) o desenvolvimento científico e tecnológico do setor. Participam de sua composição o ministro da Agricultura e Abastecimento, que o preside, e os ministros da Fazenda, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e de Minas e Energia. Atribuições de grande interesse desse conselho são a definição e a periódica revisão do teor de bioetanol na gasolina, dentro de uma faixa entre 20% e 25%. Esse teor tem se situado em 25% na maior parte dos últimos anos, embora possa ser reduzido (e efetivamente tem sido) em função das disponibilidades e das condições do mercado.

Em 2003, com o advento dos carros *flex-fuel* e sua grande aceitação pelos consumidores, na medida em que oferece aos proprietários desses veículos a opção pelo uso da gasolina (com 25% de bioetanol anidro) e/ou bioetanol hidratado, em função do preço, autonomia, desempenho ou mesmo disponibilidade, retomou-se o consumo do bioetanol hidratado no mercado interno, abrindo-se novas perspectivas para a expansão da agroindústria da cana no Brasil, que se somam às possibilidades de expansão da demanda internacional de bioetanol anidro para uso em misturas com a gasolina. Desde então, a agroindústria canavieira brasileira tem se expandido a taxas elevadas, consolidando-se economicamente e apresentando indicadores positivos de sustentabilidade ambiental, como se verá adiante neste livro.

Os Gráficos 16, 17 e 18 sintetizam bem o processo de expansão da produção de bioetanol durante as últimas décadas, comentado nos parágrafos anteriores. No Gráfico 16, nota-se como a produção de cana e bioetanol (anidro e hidratado), acompanhada pelo incremento da produção de açúcar, respondeu bem à expansão da demanda desse biocombustível [Unica (2008)], sinalizada, por sua vez, no Gráfico 17, pela evolução do teor de bioetanol anidro

na gasolina, apresentada desde o início do uso de bioetanol no país [MME (2008) e Mapa (2008)] e no Gráfico 18, pelo crescimento da produção de veículos a bioetanol hidratado.

Na primeira fase do Proálcool, a frota a bioetanol alcançou 2,5 milhões de veículos já em 1985, representando mais de 90% das vendas realizadas, participação recuperada apenas a partir de 2003 com o lançamento dos veículos flexíveis [Anfavea (2008)]. Na atualidade, 5,5 milhões de veículos brasileiros (com motores para bioetanol hidratado e motores flexíveis), o equivalente a cerca de 20% da frota circulante de 25,6 milhões de veículos, podem utilizar regularmente esse biocombustível.

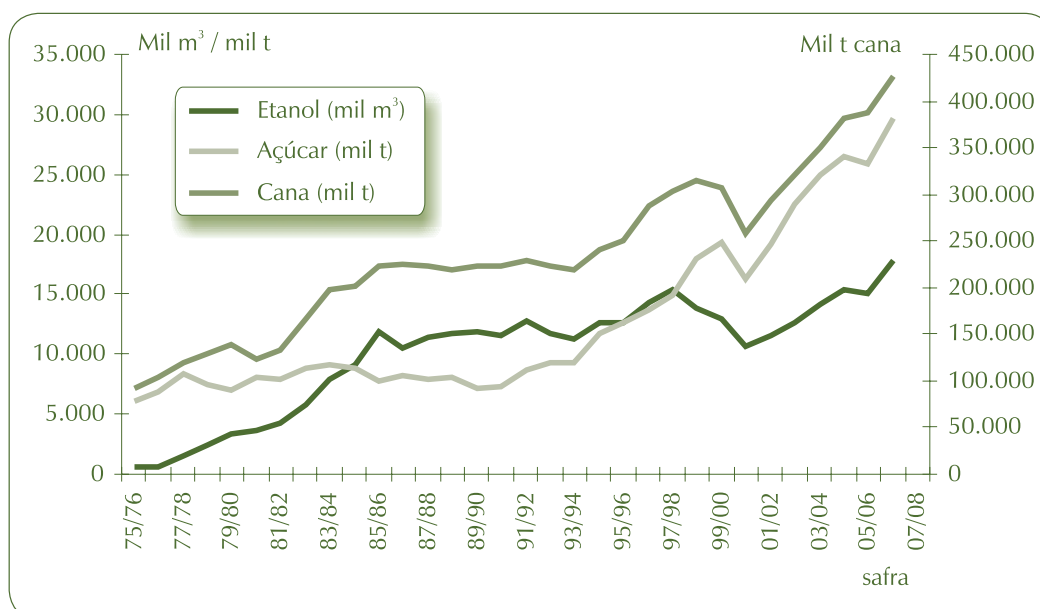
***Gráfico 16* – Evolução da produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar no Brasil**

Fonte: Unica (2008).

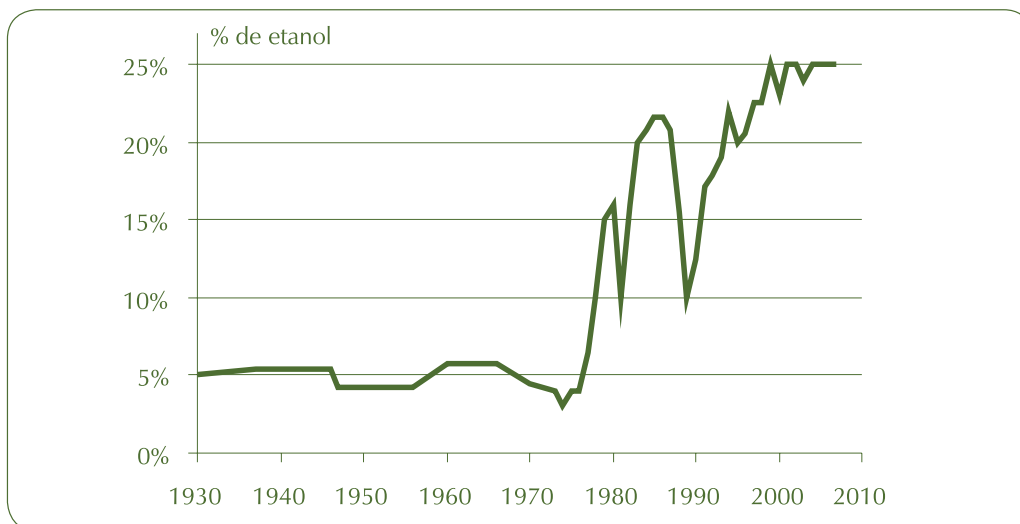
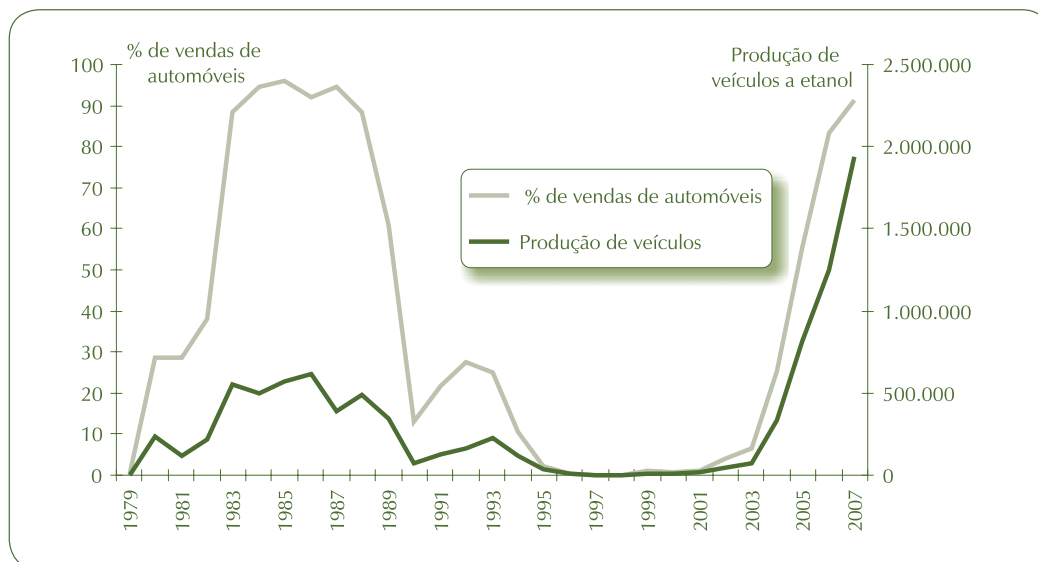
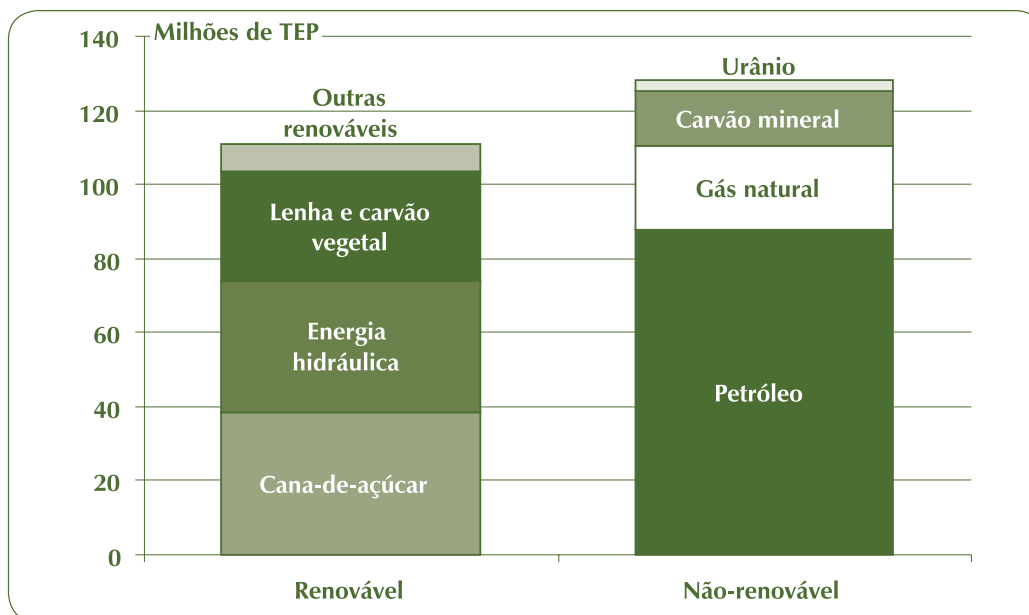
Gráfico 17 **– Teor médio de etanol anidro na gasolina brasileira**

Fonte: MME (2008).

Gráfico 18 **– Evolução da produção de veículos a etanol hidratado e de sua participação nas vendas de veículos novos**

Fonte: Anfavea (2008).

Nos Gráficos 16, 17 e 18, é possível observar claramente como, apesar do estancamento das vendas de veículos a bioetanol hidratado durante os anos 1990, a demanda desse biocombustível se manteve mais ou menos constante graças ao uso da mistura com gasolina, mantendo em operação as unidades produtoras em níveis relativamente estáveis até o começo da presente década, quando se iniciou o novo ciclo de crescimento. Assim, desde os anos 1970, o bioetanol vem sendo usado regularmente em volumes importantes no Brasil e não foi substancialmente afetado pela queda de vendas nos carros a bioetanol hidratado, exceto para os últimos anos da década passada, quando as safras de cana sofreram quedas por problemas climáticos. No curto prazo, as perspectivas são de um sustentado crescimento da demanda interna de bioetanol hidratado, com expectativas de que em 2010 a frota de veículos aptos para esse combustível alcance 9 milhões de unidades, correspondendo a 32% da frota de veículos prevista para esse ano [Pires (2007)].

Do ponto de vista econômico, estima-se que a implementação do Proálcool, entre 1975 e 1989, custou aproximadamente US$ 7,1 bilhões, sendo US$ 4 bilhões financiados pelo governo brasileiro e o restante proveniente de recursos privados [Dias Leite (2007)]. Considerando o consumo de bioetanol combustível no período de 1976 a 2005, valorizado pelo preço da gasolina no mercado mundial, a economia de divisas foi em torno de US$ 195,5 bilhões, sendo US$ 69,1 bilhões em importações evitadas e US$ 126,4 bilhões em juros da dívida externa evitados [BNDES (2006)].

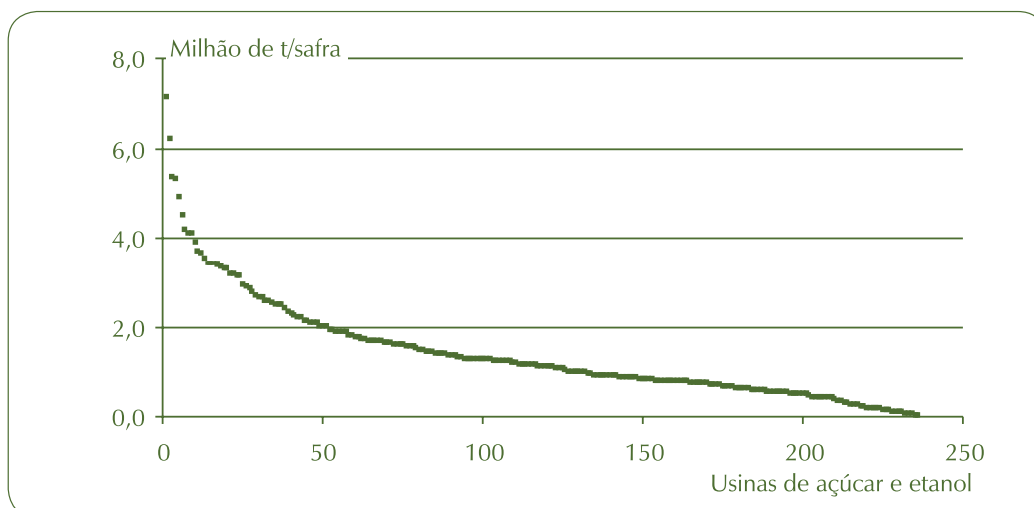
***Gráfico 19* – Fontes primárias de energia utilizadas no Brasil em 2007**

Fonte: MME (2008).

Como um resultado que sintetiza a importância da cadeia bioenergética da cana-de-açúcar no Brasil, em 2007 a participação desse segmento na matriz energética nacional alcançou 16%, pouco superior à energia hidráulica (responsável por 90% da eletricidade produzida no país), como indicado no Gráfico 19, contribuindo para a parcela expressiva de 46,4% correspondente às energias renováveis no abastecimento nacional de energia primária.

6.2 Agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil

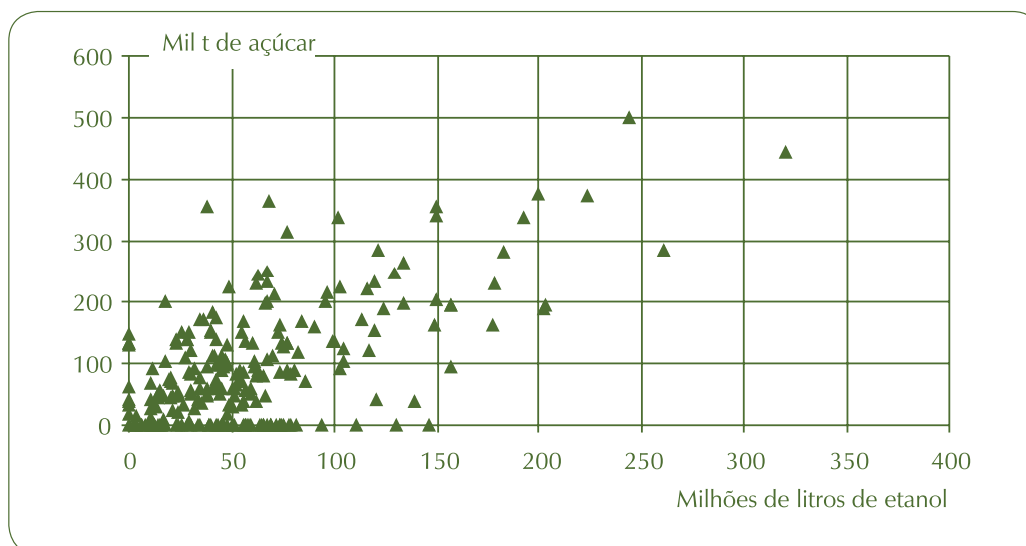
A cana-de-açúcar é cultivada no Brasil desde 1532, trazida por Martim Afonso, o primeiro colonizador português, com o propósito de implantar engenhos de açúcar como os existentes à época nas ilhas dos Açores. Essa espécie se adaptou bem ao solo brasileiro e, durante todo o período colonial, foi extensamente cultivada com bons resultados ao longo da costa brasileira, onde dezenas de engenhos foram construídos, principalmente no Recôncavo Baiano e em Pernambuco, promovendo o importante ciclo da economia canavieira no Brasil durante quase dois séculos. Com a expulsão dos holandeses do Nordeste e a expansão da agroindústria açucareira na região das Antilhas, em meados do século XVII, a produção brasileira reduziu sua importância relativa, mas permaneceu desde então como uma importante atividade na economia brasileira, revigorada a partir da criação do Instituto do Açúcar e do Álcool, em 1933, época em que o uso do bioetanol automotivo já era uma realidade nascente. Também a partir dessa época, a agroindústria canavieira começou a se expandir na Região Sudeste, associada, em princípio, à decadência da lavoura cafeeira e, posteriormente, ao crescimento do mercado interno [Szmrecsányi (1979)].

Atualmente, a cultura da cana alcança quase todos os estados brasileiros e ocupa cerca de 9% da superfície agrícola do país, sendo o terceiro cultivo mais importante em superfície ocupada, depois da soja e do milho. Em 2006, a área colhida foi da ordem de 5,4 milhões de hectares, para uma área plantada de mais de 6,3 milhões de hectares e produção total de 425 milhões de toneladas [Carvalho (2007)]. A região produtora de maior destaque é a Centro-Sul-Sudeste, com mais de 85% da produção, e o maior produtor nacional é o Estado de São Paulo, com cerca de 60% da produção. O sistema de produção envolve mais de 330 usinas, com capacidade entre 600 mil e 7 milhões de toneladas de cana processada por ano, com uma usina média processando, anualmente, cerca de 1,4 milhão de toneladas. A distribuição da capacidade anual de moagem é apresentada no Gráfico 20 (valores para a safra 2006/2007). Como se pode ver, as dez maiores usinas respondem por 15% do total de matéria-prima processada, enquanto as 182 menores unidades processam metade da cana. Esses números mostram a baixa concentração econômica dessa agroindústria, característica dos sistemas bioenergéticos.

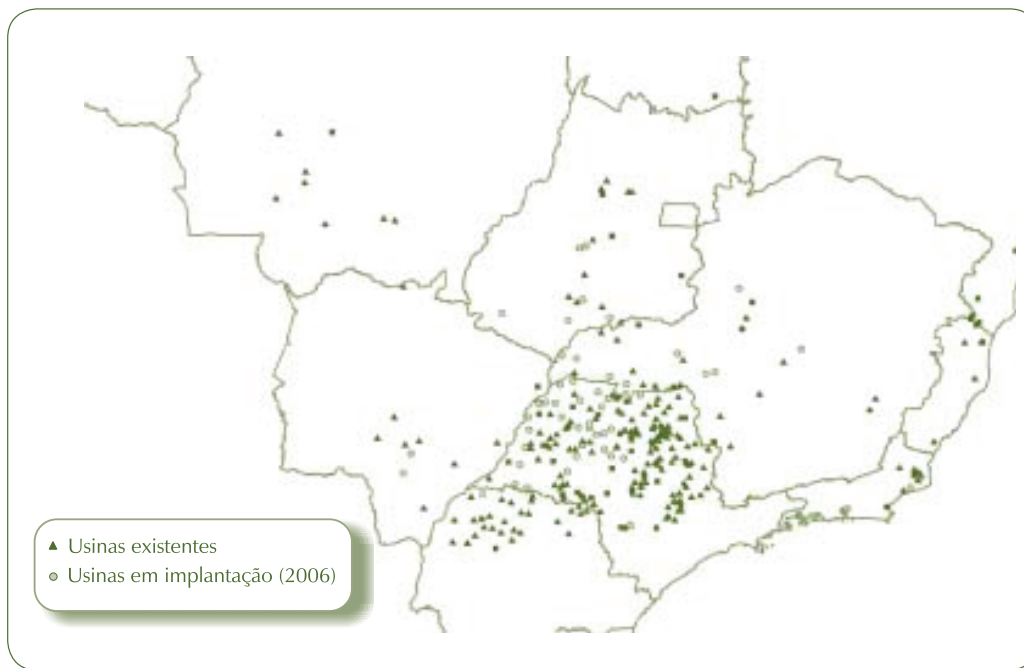
***Gráfico 20* – Distribuição da capacidade anual de processamento das usinas de açúcar e etanol no Brasil**

Fonte: Elaborado com base em Idea (2007).

As usinas brasileiras trabalham, em média, com 80% da cana proveniente de terras próprias e arrendadas ou de acionistas e companhias agrícolas com alguma vinculação às usinas. Os 20% restantes são fornecidos por cerca de 60 mil produtores independentes, a maioria utilizando menos de dois módulos agrícolas. O módulo agrícola corresponde à menor parcela de fracionamento do solo rural, de modo a permitir o sustento de uma família, e varia conforme a região. Assim, grande parte dos produtores de cana pode ser caracterizada como pequenos produtores agrícolas, que produzem cana entre outros produtos agropecuários para fins econômicos e de consumo próprio, geralmente contando com o suporte tecnológico das usinas [CGEE/NAE (2005)].

Do ponto de vista do perfil de produção, as usinas brasileiras podem ser classificadas em três tipos de instalações: as usinas de açúcar, que produzem exclusivamente açúcar, as usinas de açúcar com destilarias anexas, que produzem açúcar e bioetanol, e as instalações que só produzem bioetanol, ou destilarias autônomas. A grande maioria das instalações é formada por usinas de açúcar com destilarias anexas (cerca de 60% do total), seguidas por um considerável montante de destilarias autônomas (cerca de 35%) e por algumas unidades de processamento exclusivo de açúcar, conforme indicado no Gráfico 21. Como uma média nacional, aproximadamente 55% dos açúcares disponíveis na cana processada foram destinados à produção de bioetanol na safra 2006/2007 [Unica (2008)].

Gráfico 21 – Perfis de produção das usinas de açúcar e etanol no Brasil na safra 2006/2007

Fonte: Elaborado com base em Idea (2007).

Geograficamente, as usinas de açúcar e bioetanol situam-se junto às regiões produtoras de cana, a maior parte delas localizada no Estado de São Paulo, como mostrado na Figura 9. Nesse estado, conjugaram-se, além das excelentes condições de solo e clima, a existência de uma adequada infra-estrutura de transportes, a proximidade dos mercados consumidores e uma ativa base de desenvolvimento científico e tecnológico, fundamental para o processo de expansão com incrementos de produtividade observado nesse setor. Entretanto, nos últimos anos, com a relativa saturação das áreas disponíveis nesse estado e a elevação dos custos da terra, as novas unidades de produção têm se instalado em áreas anteriormente ocupadas por pastagens e, em menor grau, por cultivos anuais na região do Triângulo Mineiro, Sul de Goiás e Sudeste de Mato Grosso do Sul, áreas contíguas às tradicionais regiões produtoras de cana do Centro-Sul brasileiro, como mostrado na Figura 24, que permitem desenvolver sistemas produtivos similares aos existentes em São Paulo.

Figura 24 – **Localização das novas usinas de açúcar e etanol no Brasil**

Fonte: CGEE (2006).

Conforme números da safra 2006/2007, o agronegócio da cana-de-açúcar, que engloba a produção de cana, açúcar e bioetanol, movimentou em 2007 cerca de R$ 41 bilhões, correspondentes a faturamentos diretos e indiretos. Foram processados 420 milhões de toneladas de cana, produziram-se 30 milhões de toneladas de açúcar e 17,5 bilhões de litros de bioetanol e foram exportados 19 milhões de toneladas de açúcar (US$ 7 bilhões) e 3 bilhões de litros de bioetanol (US$ 1,5 bilhão), representando 2,65% do produto interno bruto (PIB) nacional. Além disso, foram recolhidos R$ 12 bilhões em impostos e taxas e realizaram-se investimentos anuais de R$ 5 bilhões em novas unidades agroindustriais [ProCana (2008)]. Esses resultados expressivos foram alcançados por um parque de unidades produtivas caracterizado pela heterogeneidade quanto à escala de produção, ao porte, à localização geográfica, às estruturas produtivas e aos perfis financeiros e administrativos. Nesse contexto, naturalmente, observam-se diferentes custos de produção e níveis de eficiência, como resultado da significativa evolução do setor sucroalcooleiro durante as últimas décadas, em termos de capacidade, perfil produtivo e flexibilização do marco regulatório.

As usinas brasileiras de açúcar e bioetanol atualmente em operação podem ser classificadas em três grupos, levando em conta sua situação financeira, os indicadores de produtividade e a introdução de tecnologias inovadoras (modificado de IEL/Sebrae, 2006):

Empresas estagnadas. Constituído pelas usinas em situação critica ou pré-critica, por causa do volume das dívidas acumuladas e da defasagem tecnológica, com reduzidas possibilidades de atuar de forma individual num setor com elevada competitividade interna. Apenas com o aporte de novos recursos e linhas específicas de financiamento, esse quadro poderá ser modificado, a fim de atualizar as tecnologias empregadas e permitir o incremento da produtividade agroindustrial.

Empresas rentáveis. Formado pelas usinas que lograram enfrentar com sucesso a desregulamentação setorial e a indefinição da política energética brasileira, expandindo a capacidade de produção e investindo em novas tecnologias, com redução de custos e aumento da produtividade. Isoladamente ou em grupos, algumas dessas empresas diversificaram suas atividades para a comercialização e a logística de exportação de seus produtos.

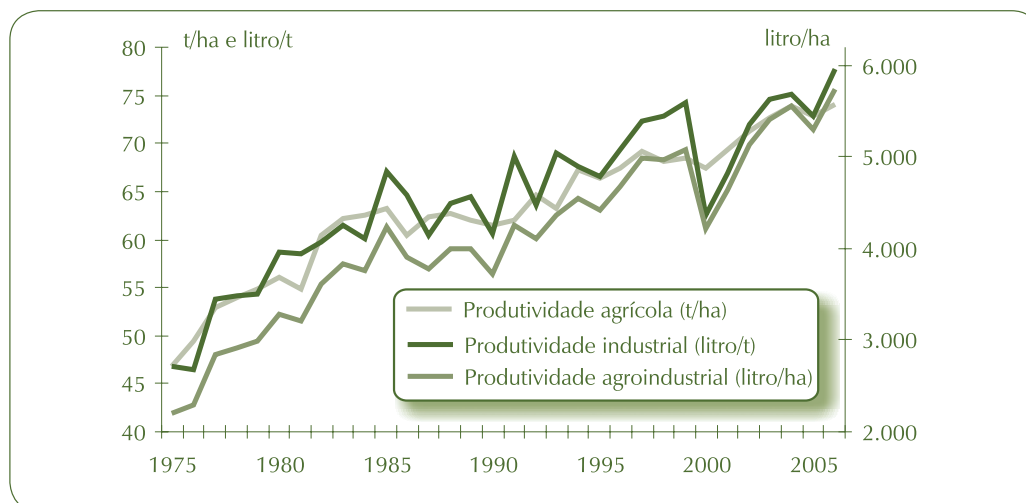
Empresas inovadoras. Constituído pela parcela das empresas rentáveis que, isoladamente ou em parcerias com empresas multinacionais, destacaram-se do grupo anterior, diversificando sua base tecnológica para produção de derivados do açúcar e abrindo novas perspectivas para a agregação de valor à cana-de-açúcar.

Associada à expansão da produção sucroalcooleira, tem ocorrido uma significativa diversificação da composição e da origem do capital investido na agroindústria, originalmente quase todo baseado em empresas familiares, em boa parte criadas e administradas por imigrantes italianos e seus descendentes, na Região Centro-Sul, e por famílias da região, no caso das usinas do Nordeste. Atualmente, além das empresas familiares, observam-se a abertura de capital de diversas empresas (Cosan, Costa Pinto, Guarani, Nova America, São Martinho) e a entrada de investidores estratégicos nacionais (Votorantim, Vale, Camargo Correa, Odebrecht) e estrangeiros, de origem variada: francesa (Tereos, Sucden, Louis Dreyfus), alemã (Sudzucker), americana (Bunge, Comanche Clean Energy, Cargill, Global Foods), espanhola (Abengoa), guatemalteca (Ingenio Pantaleón), indiana (Bharat Petroleum, Hindustran Petroleum, India Oil), britânica (ED&F Man, British Petroleum), malaia (Kouk) e japonesa (Mitsui, Marubeni).

Outra inovação nesse setor tem sido a relevante presença de investidores financeiros, novamente nacionais e estrangeiros, isolados ou em consórcio com operadores. Nesse último caso, podem ser mencionados os fundos formados para implementar plataformas de produção e comercialização de bioetanol de cana-de-açúcar, como Infinity Bio-Energy, Brenco (Empresa Brasileira de Energia Renovável) e Clean Energy Brazil. O modelo típico dos negócios envolvendo capital estrangeiro inclui sócios brasileiros, com expressiva participação de empresas estrangeiras nas dezenas de operações de aquisições e fusões realizadas nos últimos anos. Ainda que tal diversificação seja um processo da maior importância, que sinaliza a confiança dos investidores e a introdução de novos conceitos de gestão e governança, o capital estrangeiro representa uma parcela menor dos investimentos totais nesse setor, esti-

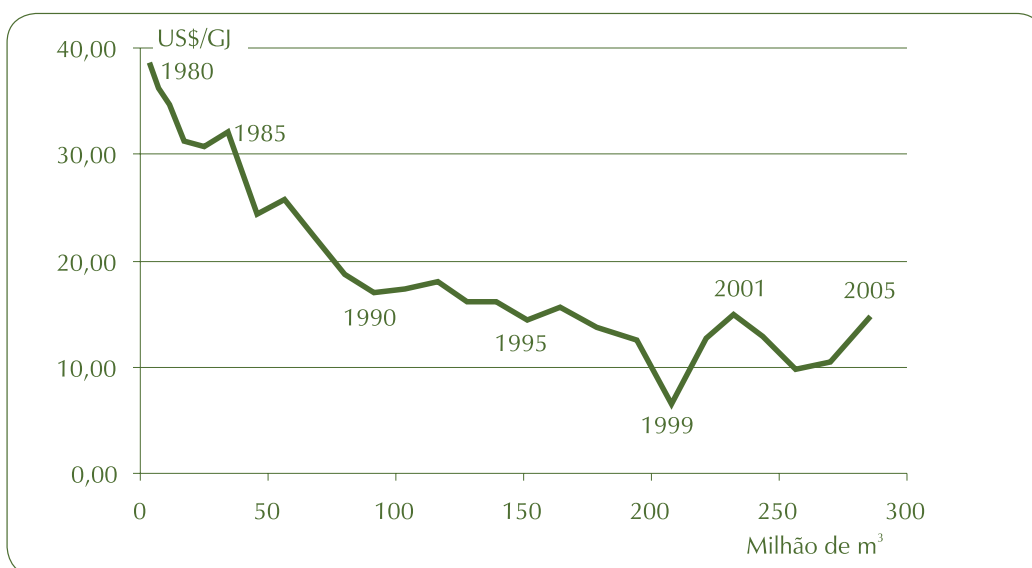
mando-se que correspondam a 12% da capacidade de processamento observada em 2007 [Nastari (2007)].

É importante observar que a expansão da produção de bioetanol e açúcar nas últimas décadas ocorreu não apenas com o aumento da área cultivada, mas também com expressivos ganhos de produtividade nas fases agrícola e industrial, que apresentaram incrementos anuais acumulados de 1,4% e 1,6%, respectivamente, e resultaram em uma taxa de crescimento anual de 3,1% na produção de bioetanol por hectare cultivado, ao longo de 32 anos, conforme apresentado no Gráfico 22, em valores médios para todas as unidades produtoras brasileiras. Para esse gráfico, os dados para a área plantada e a produção de cana foram tomados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento [Mapa (2007)] e a produção de bioetanol foi obtida das estatísticas da União da Indústria de Cana-de-Açúcar [Unica (2008)]. Graças a esses ganhos de produtividade, a área atualmente dedicada à cultura da cana para produção de bioetanol, cerca de 3,5 milhões de hectares, é 38% da área que seria requerida considerando a produção atual e a produtividade agroindustrial observada no início do Proálcool, em 1975. Esse significativo ganho de produtividade, multiplicando por 2,6 o volume de bioetanol produzido por área cultivada, foi conseguido mediante a contínua incorporação de novas tecnologias, como se comenta no próximo tópico.

***Gráfico 22* – Evolução da produtividade agrícola, industrial e agroindustrial das usinas de açúcar e etanol no Brasil**

Fonte: Elaborado com base em Mapa (2007) e Unica (2008).

Como conseqüência direta da evolução da produtividade, foi observada uma progressiva redução dos custos, que se refletiu nos valores recebidos pelos produtores, mostrados no Gráfico 23, às vezes referida como *learning curve*, configurando claramente um processo de

aprendizagem e consolidação similar ao apresentado por outras tecnologias energéticas inovadoras, como a energia eólica [Goldemberg et al (2004)]. Nessa curva, o eixo das abscissas corresponde à produção acumulada de bioetanol nas usinas brasileiras, mostrando como a experiência e os ganhos de escala se traduziram em uma progressiva queda dos preços (em dólares americanos referidos a 2002), com uma redução anual acumulada de 1,9% para os últimos 25 anos. Um aspecto relevante nesse gráfico é a tendência assintótica dos preços, que ficam praticamente constantes nos últimos dez anos, sinalizando uma maturidade no âmbito das tecnologias convencionais.

***Gráfico 23* – Evolução dos preços pagos aos produtores de etanol no Brasil**

Fonte: Adaptado de Goldemberg et al. (2005).

De acordo com a mesma lógica de crescimento com ganhos de produtividade e eficiência, a evolução do segmento sucroalcooleiro tem apresentado a formação de consórcios e grupos de unidades produtivas (*clusters*) como recurso de racionalização dos custos, particularmente nos componentes associados à adoção de novas tecnologias. Além disso, o setor tem ampliado as escalas de produção das usinas e assegurado a ocupação estratégica de áreas agrícolas contíguas [CGEE (2005)]. Nesse sentido, é notável o crescimento da capacidade unitária de processamento das novas unidades, que, mesmo atingindo mais de 7 milhões de toneladas de cana por ano (nas maiores usinas), têm conseguido manter o custo de transporte da cana em níveis competitivos mediante o uso de modais eficientes e maior ocupação com a lavoura canavieira das áreas próximas à unidade industrial. É interessante constatar que essas unidades agroindustriais de maior porte correspondem, em termos energéticos, a uma refinaria

de petróleo com 35 mil barris diários de capacidade de processamento, ou seja, uma magnitude bem inferior à observada na atual indústria petrolífera.

Nas páginas finais deste trabalho, encontram-se anexos com séries históricas de dados para a produção de bioetanol (anidro e hidratado), produção e área colhida de cana (inclusive para os principais estados produtores) e preços pagos aos produtores de bioetanol.

6.3 Pesquisa e desenvolvimento tecnológico

Na expansão da produção de bioetanol pelas usinas brasileiras, apresentada no tópico anterior, a incorporação de processos inovadores e o desenvolvimento tecnológico cumpriram um papel essencial, com incremento da eficiência na produção e progressiva redução dos impactos ambientais. Do mesmo modo, as novas possibilidades de produção bioenergética com base na cana, com o emprego de subprodutos lignocelulósicos na produção de bioetanol e eletricidade, dependem sobremaneira de processos ainda em fase de desenvolvimento.

Nesse sentido, foi e é importante a existência de instituições públicas, federais e estaduais, bem como empresas privadas voltadas para a agregação de conhecimento à cadeia produtiva do bioetanol de cana-de-açúcar, em particular na etapa agrícola, envolvendo melhoramento genético, mecanização agrícola, gerenciamento, controle biológico de pragas, reciclagem de efluentes e práticas agrícolas conservacionistas de maior desempenho [CGEE (2005)]. Essas instituições estão localizadas, em sua maioria, no Estado de São Paulo, onde também é produzida e processada a maior parte da cana-de-açúcar no Brasil e onde se situa o mais expressivo parque universitário brasileiro, responsável por cerca de metade dos trabalhos científicos anualmente produzidos no país. Dá-se assim, no mesmo espaço, uma interessante sinergia entre necessidades de suporte tecnológico e as disponibilidades de recursos humanos capacitados para seu enfrentamento, na qual o governo estadual paulista e o setor privado atuam como os maiores promotores da geração e da introdução de inovações na agroindústria.

Como exemplos de institutos paulistas ativos em tecnologia de produção agroindustrial e uso de bioetanol de cana-de-açúcar, mantidos pelo governo estadual, podem ser citados os seguintes: Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb), Instituto Biológico, além das três universidades estaduais – a Universidade de São Paulo (USP), onde se localiza a Escola de Agronomia Luiz de Queiroz (ESALQ), tradicionalmente ativa em tecnologia canavieira, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e a Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho (Unesp), com vários cursos e grupos de pesquisas voltados para a bioenergia da cana-de-açúcar.

A mais antiga dessas instituições, o Instituto Agronômico de Campinas, com estações experimentais nas regiões do estado, começou a atuar em cana ainda em 1892. Em tempos mais recentes, revigorando sua presença nessa cultura e em associação com empresas privadas, com quem divide um custo anual de R$ 2 milhões, o IAC desenvolve desde 1994 um ativo programa de melhoramento genético de variedades de cana, o ProCana, que lança periodicamente novas variedades e introduz novos métodos de manejo dos canaviais [Landell (2003)]. Esse programa introduziu com bons resultados práticas inovadoras e eficientes na gestão de suas atividades, que apresentam um impacto econômico 13 vezes superior aos investimentos [Hasegawa e Furtado (2006)].

No setor privado, destaca-se o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), criado em 1970 como Centro de Tecnologia Copersucar e, a partir de 2005, desmembrado dessa cooperativa de produtores de açúcar e bioetanol, passando a constituir uma associação civil de direito privado, sem fins lucrativos. O CTC conta atualmente com 174 usinas e associações de fornecedores de canas como seus associados, responsáveis por 60% da cana produzida no Brasil, que lhe tem permitido executar um orçamento anual de R$ 45 milhões, com um corpo de mais de 300 pesquisadores [Furtado et al. (2008)]. Embora atualmente tenham mais visibilidade seus trabalhos na área agrícola, com mais de 70 variedades de cana lançadas (canas SP e CTC), cultivadas em mais de 50% da área em cana no país, o CTC atua em toda a cadeia produtiva da cana-de-açúcar, em temas como administração rural, melhoramento de variedades, fitossanidade, sistemas de plantio e colheita, processos de extração e fermentação e sistemas de energia para as usinas de açúcar e bioetanol, tendo sido a principal base de inovações para as usinas paulistas e importante suporte técnico em temas agrícolas e industriais. No âmbito da biotecnologia da cana, o CTC desenvolve pesquisas desde 1990. Pioneiro no Brasil na criação de variedades transgênicas de cana-de-açúcar, em 1997, liderou a constituição do Consórcio Internacional de Biotecnologia de Cana-de-açúcar (ICSB), entidade que hoje congrega 17 instituições de 12 países produtores de cana. Recentemente, foram instaladas unidades de pesquisa do CTC em Pernambuco e Alagoas, dedicadas ao desenvolvimento de variedades para esses contextos [CTC (2008)]. Em síntese, o CTC foi o líder na introdução de inovações na agroindústria sucroalcooleira e o maior responsável pelo notável ganho de eficiência na produção de bioetanol observado nas últimas décadas.

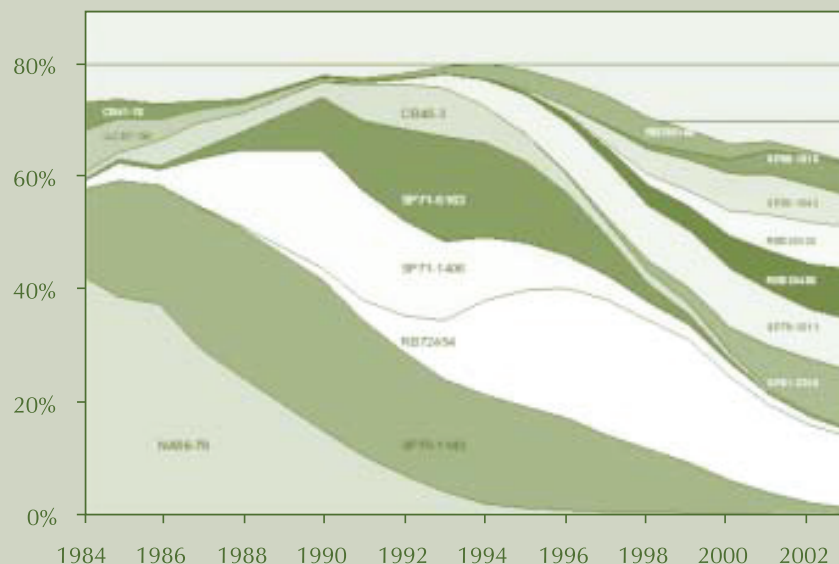
No quadro das instituições estaduais, cabe ressaltar a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), que tem cumprido um papel muito importante no fomento às atividades de pesquisa e desenvolvimento no âmbito da agroindústria canavieira, com um volume expressivo de recursos aplicados em mais de uma centena de estudos e pesquisas envolvendo a comunidade acadêmica e as empresas do setor, em temas básicos e aplicados [Fapesp (2007)]. Como exemplo de recentes iniciativas da Fapesp com empresas privadas, que aportam metade dos recursos disponibilizados para o desenvolvimento de estudos pela comunidade científica, os convênios firmados com a Dedini Indústrias de Base e Braskem prevêem, respectivamente, R$ 100 milhões para projetos de pesquisa voltados para tecnologias de fabricação de bioetanol e R$ 50 milhões para áreas de processos de síntese com base em matérias-primas renováveis, derivadas de açúcares, bioetanol e outros produtos da

cadeia dos biocombustíveis, com ênfase nos "polímeros verdes". A Fapesp financia ainda o Programa Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, voltado para a definição de subsídios às ações de governo nesse campo [Agência Fapesp (2008)].

Vinculada ao governo federal e localizada em uma tradicional região produtora de cana, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) tem cumprido um papel importante no desenvolvimento tecnológico da agroindústria do bioetanol, especialmente em sua etapa agrícola. Em 1990, o Centro de Ciências Agrárias dessa universidade incorporou o Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar (Planalsucar), vinculado ao antigo Instituto do Açúcar e do Álcool, que chegou a ter 30 estações experimentais em todo o país, contribuindo de modo importante para melhorar a produtividade da cana nos estados nordestinos, em particular em Alagoas [Furtado et al. (2008)]. A partir da base de recursos humanos e infra-estrutura do Planalsucar, e para dar continuidade às pesquisas de melhoramento genético da cana, criou-se em 1991 a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa), que envolve atualmente cerca de 140 pesquisadores de nove universidades federais (Universidades de São Carlos, Paraná, Viçosa, Rural do Rio de Janeiro, Sergipe, Alagoas e Rural de Pernambuco, Goiás e Mato Grosso) próximas das antigas estações experimentais do Planalsucar. Conduzido com sucesso, o programa já lançou, desde sua formação, 65 cultivares (canas RB), responsáveis por 57% da área cultivada com cana no Brasil [Ridesa (2008). Além do suporte do Ministério da Ciência e Tecnologia, que aportou R$ 1,8 milhão em 2006, a Ridesa conta com 130 empresas parceiras, que aportam recursos e usufruem os resultados [Inovação Unicamp (2007)].

Melhoramento genético e disponibilidade de cultivares

A sanidade vegetal dos canaviais implica a periódica renovação e a diversidade das variedades utilizadas, assegurando a manutenção da produtividade e a resistência a doenças e pragas, que em condições de monocultura podem ser bastante danosas, além das características de precocidade ou maturação tardia, adaptação ao corte mecanizado e resistência a determinadas condições climáticas, entre outras. Nesse sentido, é exemplar como a tecnologia agronômica tem proporcionado a ampliação da base de germoplasma da cana e a diversificação de variedades utilizadas pela agroindústria brasileira, por meio de quatro programas de melhoramento de cana, dois deles privados. Observe-se que, com a Lei 9.456/1997 – a Lei dos Cultivares –, as empresas e os grupos de pesquisa podem cobrar dos produtores de cana pelo cultivo das variedades desenvolvidas. A cada ano, cerca de seis novas variedades são lançadas no mercado, fazendo com que, na atualidade, sejam cultivadas perto de 500 variedades. Entre elas, a mais utilizada ocupa 12,6% da área plantada, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 **– Ocupação percentual das principais variedades de cana-de-açúcar no Brasil de 1984 a 2003**

Fonte: Burnquist e Landell (2005).

Em um programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar, o ponto de partida é o banco de germoplasma, que reúne milhares de genótipos, entre cultivares utilizados no país, outras espécies relacionadas ao gênero *Saccharum* e cultivares importadas das diferentes regiões canavieiras do mundo. Depois de serem obtidas por meio de cruzamentos preestabelecidos pelos pesquisadores, as sementes são enviadas aos laboratórios e às estações experimentais, onde são produzidas as plântulas que, uma vez transplantadas no campo, passam por sucessivas fases de seleção durante três a quatro anos, escolhendo-se algumas centenas de clones a partir de milhões de plântulas. Os clones selecionados são, então, cultivados em testes de longa duração. Normalmente, o lançamento de novas variedades tem ocorrido após cerca de 13 anos de inúmeras avaliações dos clones por meio de experimentos, observando-se sua reação às doenças e pragas e a produtividade em diferentes ambientes de produção [Ridesa (2008)].

Com base no seqüenciamento dos 50 mil genes da cana, desenvolvido entre 1988 e 2001 no Projeto Genoma Cana-de-Açúcar, patrocinado pela Fapesp, diversos grupos brasileiros vêm trabalhando em métodos biotecnológicos avançados para definir mais rapidamente os clones com maior resistência a doenças, precocidade, sacarose, biomassa total etc. Entretanto, além das dificuldades técnicas, esses estudos dependem de autorizações de longa tramitação na Comissão Técnica Nacional de Biossegurança, do Ministério de Ciência e Tecnologia [Burnquist e Landell (2005)].

Entre as instituições federais situadas em São Paulo, também devem ser mencionadas as unidades da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna, focada em temas associados à reabilitação de áreas degradadas, uso sustentável dos recursos hídricos e controle biológico de pragas e doenças; Embrapa Monitoramento por Satélite e Embrapa Informática Agropecuária, ambas em Campinas, que trabalham com aplicações do sensoriamento remoto, geoprocessamento e informática, todos eles com alguma atividade relacionada à agroindústria canavieira. Com a criação, em 2006, da Embrapa Agroenergia, sediada em Brasília, essa instituição certamente irá envolver-se mais com a temática do bioetanol e a bioeletricidade de cana-de-açúcar.

Finalmente, mas não menos importante, entre as empresas privadas atuantes na pesquisa e no desenvolvimento tecnológico nesse campo, devem ser citadas a CanaVialis e a Allelyx, localizadas em Campinas e apoiadas pelo fundo de investimentos Votorantim Ventures. Segundo essas empresas, são aplicados, anualmente, cerca de R$ 70 milhões em suas pesquisas, com destaque para um programa de melhoramento de variedades usando a técnica da transgenia, mediante a qual se inserem genes de indivíduos diferentes no genoma da cana, para obter variedades mais produtivas e mais resistentes a doenças e à seca. Para desenvolver suas atividades e atender aos contratos firmados com 34 usinas, a CanaVialis possui três estações experimentais certificadas pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio). Juntas, ambas as empresas contam com um quadro de mais de 150 pesquisadores e se dedicam a outras aplicações da biotecnologia na agroindústria da cana, como os marcadores moleculares e sistemas avançados de gestão varietal, com avaliação da vulnerabilidade genética [Furtado et al. (2008) e CanaVialis (2008)].

Essa ampla base tecnológica atuou intensamente no desenvolvimento de processos, equipamentos e sistemas, realimentando-se e motivando suas linhas de estudos e pesquisas com base na realidade tangível e imediata da agroindústria vizinha, durante as últimas décadas. Assim, é difícil afirmar qual teria sido o fator desencadeador dessa dinâmica inovadora, pois, na verdade, ocorreu um processo paralelo e simultâneo de geração e aplicação de valores: mais conhecimento aplicado, melhores tecnologias, maior eficiência, maiores ganhos, melhores perspectivas e motivação empresarial e institucional. Confirmando essa visão, uma síntese dos resultados alcançados e das perspectivas de novos avanços, em termos de produtividade agrícola (produção anual de cana por hectare plantado) e industrial (produção de bioetanol por tonelada de cana processada), é apresentada na Tabela 26, detalhando-se um pouco na Tabela 27 em quais processos se pretende melhorar a produtividade industrial.

Tabela 26 – **Impacto da introdução de novas tecnologias na produção de bioetanol**

Período		Produtividade		
		Agrícola (t/ha)	Industrial (litro/t)	Agroindustrial (litro/ha)
1977–1978	Fase inicial do Programa Nacional do Álcool Baixas eficiências no processo industrial e na produção agrícola	65	70	4.550
1987–1988	Consolidação do Programa Nacional do Álcool A produtividade agrícola e a produtividade industrial aumentam significativamente	75	76	5.700
Situação atual	Processo de produção de bioetanol operando com a melhor tecnologia disponível	85	80	6.800
2005–2010	Primeiro estágio de otimização dos processos	81	86,2	6.900
2010–2015	Segundo estágio de otimização dos processos	83	87,7	7.020
2015–2020	Terceiro estágio de otimização dos processos	84	89,5	7.160

Fonte: CGEE (2006).

Tabela 27 – **Expectativas de ganhos de eficiência em processos da produção de bioetanol**
(Em %)

Situação (conforme Tabela 26)	Perdas na lavagem de cana	Eficiência de extração	Perdas no tratamento do caldo	Rendimento na fermentação	Perdas na destilação e vinhoto
Situação atual	0,50	96,0	0,75	90,3	0,50
Primeiro estágio de otimização	0,40	96,5	0,75	91,0	0,50
Segundo estágio de otimização	0,30	97,0	0,50	91,5	0,25
Terceiro estágio de otimização	0,25	98,0	0,35	92,0	0,20

Fonte: CGEE (2006).

Como pode ser observado nas Tabelas 26 e 27, o incremento previsto para a produtividade agroindustrial, sem considerar a introdução de outras rotas para produção, como o bioetanol celulósico, deverá permitir, nos próximos anos, uma redução de 3,4% na superfície plantada, por unidade de bioetanol produzido, um relevante impacto da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico nessa agroindústria. Caso considerada também a produção de bioetanol

com base em resíduos celulósicos, a produtividade poderia alcançar, nesse mesmo horizonte de tempo, 10.400 litros de bioetanol por hectare [CGEE (2005)], correspondendo a uma redução de 33% da área plantada por unidade de bioetanol produzido.

Enquanto os resultados do aperfeiçoamento dos processos nas áreas industrial e administrativa podem ser replicados, geralmente, em diferentes regiões, para a produção da cana, as variáveis edafoclimáticas apresentam uma influência decisiva e há maior especificidade regional, que impõe o desenvolvimento descentralizado de programas de melhoramento e induz a cooperação entre empresas e o intercâmbio entre instituições para racionalizar os custos. Além disso, é oportuno comentar como essas inovações têm se difundido entre as usinas de açúcar e bioetanol. Um detalhado estudo da evolução da agroindústria canavieira paranaense entre 1990 e 2005 mostrou a grande importância da interação direta entre os institutos e supridores de tecnologia e as empresas usuárias, sendo o *learning-by-interacting* o tipo de aprendizado predominante nesse setor [Rissardi Jr. e Shikida (2007)]. Essa constatação valoriza ainda mais a existência de centros tecnológicos regionais ou descentralizados.

Nesse sentido, é necessário reforçar os vínculos já existentes entre as organizações nos diversos países com efetivo potencial para a produção eficiente de bioetanol, de modo a criar as bases corretas para o adequado desenvolvimento de sua agroindústria bioenergética. No âmbito da América Latina, como bases importantes para a promoção da diversidade e da produtividade na agricultura canavieira, podem ser citadas, entre outras, as seguintes instituições: o Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña), o Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), a Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (Dieca), na Costa Rica, e a West Indies Central Sugar Cane Breeding Station, em Barbados, essa última estação com um famoso banco de germoplasma que atende todo o Caribe.

Também com o objetivo de racionalizar as atividades de pesquisa e desenvolvimento em bioetanol, é interessante estabelecer prioridades. Para as condições do Centro-Sul brasileiro [Macedo e Horta Nogueira (2007) e CGEE (2007b)], os temas considerados de maior relevância são os seguintes:

a. processos para recuperação e uso da palha e bagaço excedentes;

b. desenvolvimento de variedades transgênicas de cana;

c. seleção de cultivares (melhoramento convencional para novas áreas e adoção do conceito da cana energética, em que se procura maximizar o resultado global que pode ser conseguido mediante o processamento do açúcar e da fibra para produção de energia);

d. desenvolvimento de equipamentos e processos para a extração do caldo, tratamento, fermentação e separação do bioetanol;

e. sistemas para agricultura de precisão, em que as intervenções no cultivo são definidas com auxílio de técnicas de geoprocessamento e sistemas de posicionamento global (GPS – *global positioning systems*);

f. controles biológicos de pragas e doenças;

g. práticas de cultivo da cana adequadas para a colheita mecânica;

h. novos produtos e processos de sucroquímica e alcoolquímica;

i. uso final do bioetanol: aperfeiçoamentos na tecnologia de motores bicombustível e células a combustível operando com bioetanol.

A experiência brasileira e, em particular, a do Estado de São Paulo no financiamento das atividades de pesquisa e desenvolvimento na agroindústria do etanol indicam a necessidade de, além de prover os recursos em nível compatível, tomar as seguintes iniciativas: estruturar um plano de ação com objetivos e competências claras, estabelecendo uma gestão coordenada das várias atividades e contemplando mecanismos de acompanhamento e divulgação dos resultados; reforçar os programas de capacitação de pessoal, especialmente em nível de pós-graduação; promover programas de unidades-piloto semicomerciais e unidades de demonstração, nas tecnologias novas; e, por fim, valorizar as estruturas existentes, a fim de consolidar os centros atualmente ativos (eventualmente, incorporando novos laboratórios e equipamentos), além de promover e articular a capacitação disponível.

Como uma das possíveis formas de articular o financiamento em condições sustentáveis das atividades de pesquisa e desenvolvimento no âmbito da agroindústria energética, foi sugerida a constituição de um fundo de fomento às atividades de pesquisa e desenvolvimento (CT-Etanol), com o objetivo específico de financiar estudos básicos e aplicados em toda a cadeia produtiva dos biocombustíveis. Com isso, seria possível replicar os bons resultados obtidos com os chamados Fundos Setoriais, em que uma parcela dos recursos gerados em um dado setor energético (petróleo, energia elétrica) é utilizada para geração e agregação de conhecimento nesse mesmo setor. Estima-se que, com a aplicação de uma alíquota de 0,5% sobre a receita líquida com a venda do bioetanol, poderiam ser arrecadados cerca de R$ 185 milhões, que ajudariam a assegurar o dinamismo tecnológico desse setor [Cortez (2007)].

Durante a preparação deste livro, o Ministério da Ciência e Tecnologia anunciou a criação do Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que deverá funcionar no Pólo Tecnológico de Campinas, dedicando-se ao amplo espectro de tecnologias de interesse para a conversão eficiente da biomassa em energia. Atualmente em fase de estruturação, esse centro incluirá laboratórios para pesquisa básica e uma planta-piloto, prevendo-se um foco maior nos estudos básicos do fenômeno da fotossíntese, em sistemas de produção de biomassa e em processos avançados para produção de biocombustíveis, como a hidrólise.

Capítulo 7

Sustentabilidade do bioetanol de cana-de-açúcar: a experiência brasileira

Em uma acepção ampla e não apenas energética, impõe-se, de um modo cada vez mais decisivo, que os sistemas energéticos sejam não apenas conceitualmente renováveis, mas também sustentáveis. Assim, como definido pela Comissão Brundtland nos anos 1980, espera-se que os sistemas energéticos sejam capazes de "satisfazer às necessidades das gerações atuais sem comprometer as futuras, atendendo ao equilíbrio social e ecológico bem como às necessidades dos mais pobres" [United Nations (1987)]. Contudo, determinar a sustentabilidade de um sistema energético não é uma tarefa simples e depende não apenas do vetor energético em si, mas, fundamentalmente, do contexto de sua produção e utilização. Nesse sentido, em geral, é mais simples demonstrar a insustentabilidade de um sistema energético (não-renovável, poluidor etc.) do que assegurar a sustentabilidade de sistemas baseados em energias renováveis, principalmente no caso das bioenergias.

Ainda que o debate sobre a sustentabilidade das bioenergias esteja em curso e, com freqüência, se polarize entre visões utilitaristas e preservacionistas, o aproveitamento pelas sociedades humanas dos fluxos energéticos associados à produção vegetal vem sendo praticado há milênios, mediante a agricultura nos mais diferentes ecossistemas, e deve ser efetivamente considerado uma alternativa energética, a ser mais bem conhecida e promovida nos contextos em que se mostrar adequada. Assim, este capítulo apresenta a produção de bioetanol de cana-de-açúcar sob o prisma da sustentabilidade, definida como a possibilidade de os sistemas bioenergéticos manterem sua produção em largo prazo, sem depleção sensível dos recursos que lhe dão origem, como a biodiversidade, a fertilidade do solo e os recursos hídricos. Tal enfoque se baseia em uma das

definições clássicas de sustentabilidade: "condição em que a produção pode ser mantida indefinidamente sem degradar os estoques de capital, incluindo-se os estoques de capital natural" [Goodland (1992)].

Após a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, o Earth Summit, realizado no Rio de Janeiro em 1992, a sustentabilidade passou a ser considerada nos seus três pilares – ambiental, social e econômico –, tornando-se um conceito de amplo uso e permanente presença nos debates sobre as perspectivas de crescimento dos países. Nessa direção, no presente capítulo, a sustentabilidade será abordada desde sua perspectiva ambiental local e global e serão analisados os aspectos referentes à viabilidade econômica e social desse biocombustível, sempre se referindo ao caso brasileiro, um modelo que, em princípio, pode ser replicado em outros países com suficiente disponibilidade de terras de cultivo e condições edafoclimáticas similares. E como temas pertencentes à problemática da sustentabilidade, discutem-se ainda o uso do solo e o zoneamento agroecológico para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil e os avanços e as perspectivas relacionadas à certificação dos biocombustíveis.

7.1 Ambiente e energia da cana-de-açúcar

Como primeiro ponto a mencionar sobre as implicações ambientais da produção de bioetanol, é fundamental a existência de uma legislação que oriente os produtores para as melhores práticas e coíba ações que degradem o meio ambiente. Com esse propósito, para a implantação e a operação de usinas de açúcar e bioetanol no Brasil, é necessário, nos termos da Resolução Conama 237/1997, que sejam adequadamente cumpridas as três fases do licencimento ambiental, caracterizadas pela obtenção das seguintes licenças:

a. Licença Prévia (LP) – aprova a localização e a concepção e estabelece requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas fases seguintes.

b. Licença de Instalação (LI) – autoriza a instalação e inclui medidas de controle ambiental.

c. Licença de Operação (LO) – autoriza a operação após o cumprimento das exigências estabelecidas nas licenças anteriores, devendo ser renovada periodicamente.

Os documentos básicos para esse processo de licenciamento são o Estudo de Impacto Ambiental e o respectivo Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente (EIA/Rima). São obrigatórias a realização de audiência pública para sua apresentação e a definição de uma compensação ambiental, como o plantio de espécies nativas ou a formação de uma reserva natural permanente. As exigências apresentadas para a instrução desses estudos e os requisitos a serem atendidos são estabelecidos pela legislação de modo crescente, em função da capacidade de processamento das unidades agroindustriais. No caso de projetos de menor capacidade ou alteração do processo, que não sejam causadores de impactos ambientais, como a ampliação de sistemas de co-geração, pode-se exigir um Relatório Ambiental Preliminar (RAP), em um procedimento simplificado.

A seguir, são comentados os temas mais relevantes associados aos impactos ambientais na produção de cana e bioetanol, como as emissões de efeito global (gases de efeito estufa) e local (especialmente associadas à queima pré-colheita da cana), o uso de água e a disposição dos efluentes (inclusive a vinhaça), o uso de defensivos agrícolas e fertilizantes, a erosão e a proteção da fertilidade do solo e da biodiversidade, sempre tendo em vista a realidade da agroindústria brasileira da cana.

Emissões de gases de impacto global

Por causa do elevado rendimento fotossintético observado na produção da cana-de-açúcar e do processo eficiente para sua conversão em biocombustível, a utilização de bioetanol obtido dessa matéria-prima permite reduzir, de forma importante, as emissões de gases de efeito estufa, em comparação com o uso do combustível fóssil (gasolina), para um mesmo efeito útil final em veículos.

Essa contribuição para a redução do câmbio climático é um dos aspectos mais importantes associados ao bioetanol de cana-de-açúcar. Esse tema foi apresentado em detalhes no tópico 3.5 (Produtividade, emissões e balanços energéticos), no qual não apenas fica evidente o impacto positivo que o etanol de cana traz, mas também se observa como as demais matérias-primas são pouco eficazes nesse sentido, com as tecnologias atualmente empregadas.

Na Tabela 28, apresenta-se uma síntese do balanço de carbono, com as emissões de gás carbônico na produção e no uso do bioetanol, para as condições típicas dessa agroindústria, sem levar em conta outros gases nem efeitos de segunda ordem, considerando todas as operações de produção e uso nas condições observadas no Centro-Sul brasileiro. Os valores apresentados nessa tabela foram calculados levando em conta a composição dos vários produtos da cana e os balanços de massa atualmente observados na agroindústria. Esses valores consideram ainda que são processadas 12,5 toneladas de cana para fornecer mil litros de bioetanol. Com os avanços previstos, esses resultados deverão ser ainda melhorados.

***Tabela 28* – Balanço resumido das emissões de gás carbônico na agroindústria do bioetanol de cana-de-açúcar no Centro-Sul brasileiro (kg/mil litros de bioetanol)**

Etapa	Absorção de CO_2 na fotossíntese	Liberação de CO_2	
		Fóssil	Fotossintético
Plantio		173	
Crescimento	7.464		
Colheita e transporte		88	2.852
Fabricação do etanol		48	3.092
Uso do etanol			1.520
Total	7.464	309	7.464

Fonte: Elaboração de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Como pode ser observado, o carbono liberado para a atmosfera corresponde à soma do carbono de origem fotossintética, absorvido durante o crescimento da cana e depois liberado em quatro etapas – na queima da palha, na fermentação (conversão dos açúcares em bioetanol), na queima do bagaço nas caldeiras e na queima do bioetanol nos motores –, e do carbono de origem fóssil, que corresponde a um aporte líquido na atmosfera, resultante, por sua vez, das operações agrícolas e industriais e da produção de insumos e equipamentos. Desse modo, apenas o carbono de origem fóssil deve ser considerado, já que o carbono fotossintético liberado corresponde ao absorvido pela cana. Comparando-se, então, o aporte líquido das emissões fósseis, da ordem de 309 kg de CO_2 por mil litros de bioetanol produzido, com a emissão estimada para a gasolina, 3.009 kg de CO_2 (incluindo um incremento de 14% nas emissões na produção), e assumindo idêntico desempenho em termos de uso final, resulta uma redução da ordem de 90% nas emissões de carbono. Esses valores pouco se alteram quando considerados os efeitos de segunda ordem, associados a outros gases além do dióxido de carbono, como determinado no tópico 3.5 anteriormente mencionado.

Resultados similares, que respaldam as vantagens ambientais diferenciadas do bioetanol de cana-de-açúcar em termos de redução das emissões de gases do efeito estufa e conseqüente mitigação do câmbio climático, têm sido apresentados em diversos estudos [Concawe (2007), Esmap (2005) e IPCC (2008)].

De acordo com a Comunicação Brasileira para a Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudança do Clima, em 1994, as emissões de carbono de todo o setor energético foram reduzidas em 13% com a utilização da energia da cana. Para os volumes de produção dessa agroindústria no Brasil, em 2003, a substituição de gasolina por etanol e a geração de energia com bagaço reduziram as emissões de CO_2 equivalente em 27,5 milhões e 5,7 milhões de toneladas [Goldemberg et al. (2008)]. Desse modo, para cada 100 milhões de toneladas de cana destinadas a fins energéticos, poderia ser evitada a emissão de 12,6 milhões de toneladas de CO_2 equivalente, considerando etanol, bagaço e a energia elétrica excedente fornecida à rede [Unica (2007)].

Emissões de gases de impacto local

Na produção do bioetanol, as emissões de impacto local que preocupam estão associadas, essencialmente, à queima da palha da cana pré-colheita e às emissões nas chaminés das caldeiras. A queima da palha aumenta a produtividade da colheita, mas a fuligem que produz é um problema ambiental que afeta principalmente as cidades localizadas nas regiões canavieiras. Por isso, há uma forte disposição dos órgãos públicos brasileiros para restringir essa prática, o que implica, indiretamente, eliminar o corte manual, bastante dificultado no caso da cana crua, isto é, a cana sem queimar.

O melhor exemplo dessa postura se encontra em São Paulo, onde a Lei Estadual 11.241, de 2002, estabeleceu um cronograma para a colheita da cana crua em todas as áreas mecanizáveis até 2021, permitindo que as áreas restantes e menores do que 150 hectares efetuem queimadas até 2031. Por pressões de entidades ambientalistas e do Ministério Público, um protocolo entre o governo estadual paulista e a agroindústria canavieira antecipou esses prazos para 2014 e 2017, respectivamente, com restrições adicionais para queima em áreas de expansão. Nesse sentido, a autorização para a operação das 56 novas unidades produtoras de etanol em São Paulo, a partir de 2008, foi condicionada à adoção integral da colheita de cana crua. Os resultados desse processo têm sido evidenciados mediante sensoriamento remoto por satélite e mostram que a colheita de cana sem queimar alcançou 47% da área colhida em São Paulo na safra 2007/2008, evitando a emissão de 3.900 toneladas de material particulado [Cetesb (2008)]. Em outros estados, como Goiás e Mato Grosso, observam-se iniciativas similares, que estabelecem cronogramas para eliminação das queimadas, mas ainda sem resultados medidos. Além das questões ambientais, também a possibilidade de utilizar a energia da palha para produção de energia elétrica é um fator de estímulo para a adoção da colheita de cana crua.

Com a introdução de caldeiras modernas nas usinas, com menor excesso de ar e queimando bagaço sob temperaturas de chama mais elevadas, os teores de óxidos de nitrogênio nos

gases de chaminé atingiram níveis similares aos observados em outros sistemas térmicos de potência e passaram a ser controladas pelos órgãos ambientais, de acordo com a legislação própria, que estabelece limites e penalidades para tais emissões (Resolução Conama 382, de 2006). Nesse contexto, as emissões das caldeiras podem e, efetivamente, têm sido abatidas mediante sistemas convencionais de limpeza dos gases de chaminé, com resultados positivos, por isso não parecem ser, para o caso da agroindústria do bioetanol, um problema relevante.

Uso de recursos hídricos e disposição de efluentes

Do ponto de vista dos recursos hídricos, as condições particularmente favoráveis nos países das regiões tropicais úmidas, como é o caso do Brasil, com regime pluvial farto e bem distribuído, permitem que a maioria das culturas se desenvolva sem irrigação. No caso brasileiro, estima-se que as áreas agrícolas irrigadas sejam de 3,3 milhões de hectares, cerca de 4% da superfície cultivada. O deflúvio médio anual no território brasileiro é de 5,74 mil km^3, frente a um consumo estimado de 55 km^3, ou seja, inferior a 1% da oferta e permitindo uma disponibilidade anual de 34 mil m^3 de água por habitante [Souza (2005a)]. Não obstante, existem regiões brasileiras em que as disponibilidades anuais são inferiores a 1,5 mil m^3 de água por habitante, caracterizando uma situação crítica de abastecimento de água. Está em curso a implementação de sistemas de outorga e cobrança pelo uso d´água pelos Comitês de Bacia, nos termos da Lei 9.433/1997, a Lei das Águas, que deverá estimular o seu uso mais responsável e a redução dos lançamentos dos poluentes nos corpos hídricos, por conta da aplicação do princípio "poluidor/pagador".

Dependendo do clima, a cultura da cana requer de 1.500 mm a 2.500 mm de lâmina d´água adequadamente distribuídos (um período úmido e quente para crescimento e um período seco para maturação e acúmulo de açúcar) durante o ciclo vegetativo. No Brasil, a irrigação, na cultura da cana, praticamente não é utilizada na Região Centro-Sul, sendo adotada apenas nos períodos mais críticos na região Centro-Oeste e, de modo um pouco mais freqüente, na região Nordeste, sob o conceito de "irrigação de salvação", após o plantio da cana, para garantir a brotação em condições de déficit hídrico e como "irrigação suplementar", feita com diferentes lâminas de água nas épocas mais críticas do desenvolvimento do vegetal [Souza (2005a)]. Acredita-se que, à medida que áreas com menor disponibilidade hídrica passem a ser ocupadas com canaviais, a irrigação poderá se mostrar interessante para manter a produtividade agrícola, devendo, nesse caso, ser efetuada no âmbito da legislação vigente. Atualmente, segundo os critérios da Embrapa, as lavouras de cana não apresentam impactos na qualidade da água [Rosseto (2004)].

No âmbito do processo industrial, além do volume captado para o processamento da cana, um volume importante de água entra na usina com a própria cana, já que 70% do peso dos colmos é constituído de água. Assim, embora seja estimado um consumo de processo da ordem de 21 m^3 por tonelada de cana processada, a captação e o lançamento de água são bem inferiores. Com relação aos usos, 87% do consumo da água ocorrem em quatro processos: lavagem de cana, condensadores/multijatos na evaporação e vácuos, resfriamento de dornas

e condensadores de álcool. Com a racionalização do consumo da água (reutilizações e fechamentos de circuitos e algumas mudanças de processo, como a limpeza a seco e a redução da lavagem da cana, por conta do corte mecanizado), a captação tem sido reduzida de modo significativo. Levantamentos realizados em 1997 e 2005 apontavam uma redução da captação média de 5 m^3 para 1,83 m^3 por tonelada de cana processada, com expectativas de atingir, em médio prazo, 1 m^3 por tonelada de cana processada [Elia Neto (2005)].

Os principais efluentes líquidos observados na produção de bioetanol e seus sistemas de tratamento são apresentados na Tabela 29. Um levantamento feito em 34 usinas indicou que o tratamento utilizado reduz a carga orgânica em 98,40%, com um remanescente de 0,199 kg DBO/t cana [Elia Neto (2005)]. A fertirrigação, mediante a qual se aplica a vinhaça nos canaviais, é a principal forma de disposição final da carga orgânica, com vantagens ambientais e econômicas. Por sua importância, cabe analisar um pouco mais a questão da vinhaça.

Tabela 29 **– Efluentes líquidos da agroindústria do bioetanol**

Efluente	Características	Tratamento
Água de lavagem de cana	Médio potencial poluidor e alta concentração de sólidos	Decantação e lagoas de estabilização para o caso de lançamento em corpos d'água. Na reutilização, o tratamento consiste em decantação e correção do pH
Águas dos multijatos e condensadores barométricos	Baixo potencial poluidor e alta temperatura (~ 50° C).	Tanques aspersores ou torres de resfriamento, com recirculação ou lançamento
Águas de resfriamento de dornas e de condensadores de álcool	Alta temperatura (~ 50° C)	Torres de resfriamento ou tanques aspersores para retorno ou lançamento
Vinhaça e águas residuárias	Grande volume e carga orgânica elevada	Aplicação na lavoura de cana conjuntamente com as águas residuárias

Fonte: Elia Neto (2005).

A vinhaça, produzida à razão de 10,85 litros por litro de bioetanol, constitui o mais importante efluente líquido da agroindústria da cana. Em sua composição, apresenta teores elevados de potássio (cerca de 2 kg por m^3) e de matéria orgânica, mas é relativamente pobre nos demais nutrientes. No início do Proálcool, a vinhaça era lançada diretamente nos rios, com graves problemas ambientais, atenuados com o uso das bacias de infiltração e resolvidos a partir de 1978 com os sistemas de fertirrigação.

A área dos canaviais atingida pela fertirrigação depende da topografia e da distribuição de terras da usina – há usinas que aplicam vinhaça em 70% da sua área de cultivo e outras têm valores bem menores. Atualmente, procura-se estender essa área coberta pela vinhaça para

aumentar a produtividade agrícola e reduzir o uso de fertilizantes químicos, o que tem levado a doses cada vez menores, diminuindo os riscos de salinização e contaminação do lençol freático [Souza (2005b)]. Entre as usinas paulistas, predominam os sistemas de bombeamento e aspersão para a aplicação de vinhaça, embora também se empreguem caminhões-tanques convencionais para sua distribuição.

Estudos de longa duração sobre os efeitos da aplicação da vinhaça nos canaviais, considerando a lixiviação dos nutrientes e as possibilidades de contaminação de águas subterrâneas, confirmam seus benefícios para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como elevação do pH, aumento da capacidade de troca catiônica e da disponibilidade de certos nutrientes, melhoria da estruturação do solo, aumento na retenção de água e no desenvolvimento da microflora e microfauna do solo. Com efeito, utilizada em taxas adequadas, inferiores a 300 m^3 por hectare, respeitando as características dos solos em que é aplicada e a localização das nascentes d'água, a vinhaça, além de fornecer água e nutrientes, age como recuperadora da fertilidade do solo, mesmo em profundidade [Souza (2005b)]. Atualmente, a vinhaça é considerada um fertilizante orgânico, sendo liberada para a produção de açúcar "orgânico", em que não podem ser utilizados insumos químicos, tais como herbicidas, inseticidas e adubos minerais.

Algumas regiões do Estado de São Paulo, tradicionais produtoras de cana-de-açúcar, encontram-se em áreas ambientalmente vulneráveis, como pontos de recarga de importantes aqüíferos paulistas, por isso, nesses casos, o uso intensivo e freqüente de vinhaça poderia ocasionar a poluição de águas subterrâneas no longo prazo. Considerando tais condições, a legislação ambiental referente ao uso da vinhaça tem evoluído. Em 2005, a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo divulgou uma norma técnica sobre os critérios e procedimentos para aplicação, movimentação e disposição da vinhaça em solo agrícola [SMA (2005)]. Essa norma estipula, principalmente, medidas de proteção das águas superficiais e subterrâneas, exigindo impermeabilização de tanques de armazenamento e canais de distribuição do resíduo, locais passíveis de aplicação e a dose máxima de 185 kg de K_2O por hectare, calculada em função do teor de potássio presente na vinhaça, limitando em 5% a capacidade de troca de cátions do solo ocupada por íons de potássio [Bertoncini (2008)]. Tal legislação é compulsória no Estado de São Paulo e, nos moldes de outras normas de cunho ambiental, tende a ser adotada no resto do país.

Independentemente dos resultados alcançados com a fertirrigação, subsiste o interesse em aproveitar o conteúdo energético remanescente na vinhaça, mediante sua biodigestão e a produção de biogás. Outra linha de investigação é a concentração da vinhaça, por exemplo, através da recirculação na fermentação, combinada com a pré-concentração do caldo ou utilizando membranas, visando reduzir seu volume e facilitar seu transporte a distâncias maiores [CGEE (2005)]. As duas alternativas ainda não alcançaram indicadores de viabilidade econômica motivadores, como já observado no Capítulo 4, mas, com a evolução dos processos, podem vir a ser adotadas em médio prazo, especialmente nos contextos em que a topografia e as distâncias tornem a fertirrigação mais difícil.

Como uma indicação importante da evolução da agroindústria canavieira no tratamento e na redução de lançamento de seus efluentes líquidos nos corpos hídricos, um estudo da Cetesb, nas 16 bacias hidrográficas do Estado de São Paulo onde existe produção de bioetanol, estimou uma descarga potencial de 9.340 mil toneladas diárias de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) associada às usinas de açúcar e bioetanol e um lançamento efetivo de 100 mil toneladas, o que significa um abatimento de 99% do potencial poluidor, avaliado pela carga orgânica [Moreira (2007)]. Naturalmente, esses resultados expressivos foram estimulados pela ação fiscalizadora, mas indicam que estão disponíveis e em uso tecnologias capazes de mitigar de modo significativo o impacto dos efluentes líquidos sobre os cursos de água.

Apesar dos resultados alcançados, em função da magnitude da área ocupada e da produção de bioetanol, justificam-se permanentes esforços para manter ou reduzir os impactos ambientais desses efluentes. Nessa direção, são interessantes as medidas que vêm sendo adotadas para a proteção dos mananciais, em particular com o progressivo abandono do cultivo da cana nas denominadas Áreas de Preservação Permanente (APP), cerca de 8% da área cultivada, o que permitirá sua recuperação de modo espontâneo ou a recomposição com reflorestamento, principalmente nas matas ciliares, com efeitos positivos relevantes sobre a biodiversidade [Ricci Jr. (2005a)].

Uso de defensivos agrícolas

Na produção de cana-de-açúcar, são usados regularmente produtos químicos como inseticidas, fungicidas, herbicidas e agentes maturadores ou retardadores de florescimento, em níveis que podem ser considerados baixos em comparação à média observada em outros cultivos comerciais de importância.

***Tabela 30* – Uso de defensivos agrícolas nas principais culturas no Brasil (Em kg de ingrediente ativo por hectare)**

Produto	Ano	Cultura				
		Café	Cana-de-açúcar	Laranja	Milho	Soja
Fungicida	1999	1,38	0,00	8,94	0,00	0,00
	2003	0,66	0,00	3,56	0,01	0,16
Inseticida	1999	0,91	0,06	1,06	0,12	0,39
	2003	0,26	0,12	0,72	0,18	0,46
Acaricida	1999	0,00	0,05	16,00	0,00	0,01
	2003	0,07	0,00	10,78	0,00	0,01
Outros defensivos	1999	0,06	0,03	0,28	0,05	0,52
	2003	0,14	0,04	1,97	0,09	0,51

Fonte: Arrigoni e Almeida (2005) e Ricci Jr. (2005b).

Conforme apresentado na Tabela 30, os valores de consumo de agroquímicos para algumas das principais culturas brasileiras, segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola (Sindag), varia bastante de acordo com a planta. No caso da cana-de-açúcar, o consumo de fungicidas é praticamente nulo e os inseticidas são usados em quantidades proporcionalmente menores.

A menor utilização desses defensivos decorre de procedimentos de combate às doenças, principalmente por meio da seleção de variedades resistentes, em programas de melhoramento genético e sobretudo pela adoção, com excelentes resultados, de métodos biológicos de controle das principais pragas da cana, a broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*), espécie de mariposa combatida com a vespa *Cotesia flavipes*, e a cigarrinha das raízes da cana-de-açúcar (*Mahanarva fimbriolata*), controlada mediante aplicações do fungo *Metarhizium anisopliae* [Arrigoni e Almeida (2005)].

Larva da broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*) e seu parasitóide, a vespa *Cotesia flavipes*.

O controle biológico emprega parasitóides ou predadores para controlar, com alta especificidade e baixo impacto, pragas em agricultura. Esse método apresenta vantagens econômicas em relação ao uso de inseticidas convencionais, pois não faz uma aplicação indiscriminada de produtos químicos e mantém as pragas em um nível mínimo tolerável. A limitação da queima da cana deve aumentar a necessidade do uso desses controles sobre a cigarrinha.

No combate às ervas daninhas, a cana ainda utiliza mais herbicidas que o café ou o milho, mas menos que a citricultura; sendo, nesse sentido, equivalente à soja. Entretanto, com a progressiva adoção da colheita de cana crua, a parte da palha que permanece sobre o solo

promove uma supressão na germinação e na emergência de plantas invasoras, determinando um consumo significativamente menor de herbicidas [Urquiaga et al. (1991)]. A respeito do uso de agroquímicos, é importante mencionar que a Lei 7.802/89 determina o uso do receituário agronômico, definindo responsabilidades e procedimentos de aplicação e descarte dos vasilhames.

Uso de fertilizantes

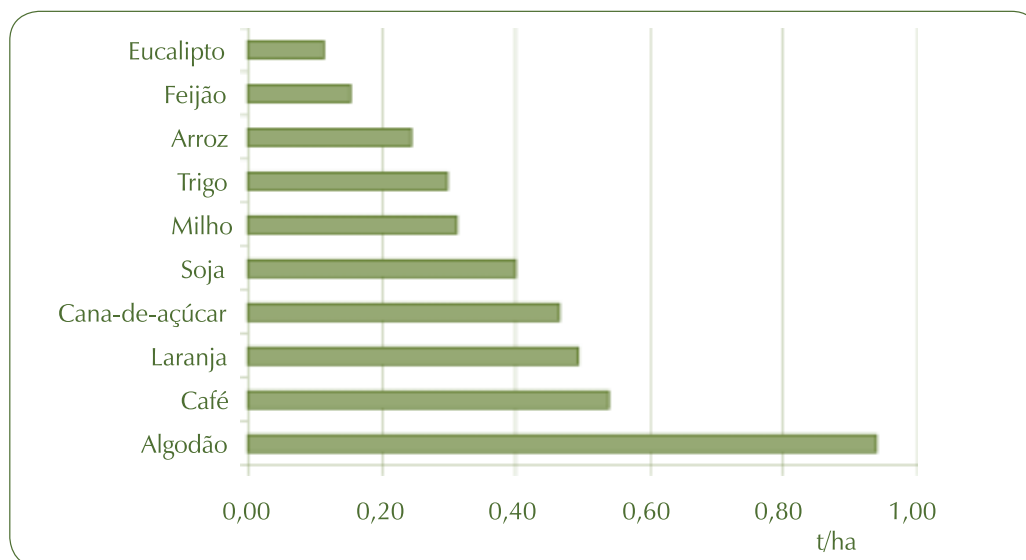
Como a reciclagem de nutrientes é uma de suas características importantes, a cultura da cana no Brasil consome uma quantidade relativamente baixa de fertilizantes convencionais. Com efeito, a fertirrigação com a vinhaça reduziu bastante a necessidade de aporte de potássio, e sua complementação com as águas do processo industrial e as cinzas das caldeiras ampliou a oferta de nutrientes para os canaviais, com benefícios econômicos e ambientais. Considerando todo o ciclo produtivo típico de um canavial (cana-planta e quatro canas-soca), nas condições médias brasileiras, a aplicação da vinhaça e da torta de filtro, embora não traga efeitos relevantes sobre a oferta de nitrogênio, permite reduzir a demanda de fósforo (P_2O_5) de 220 kg/ha para 50 kg/ha e de potássio (P_2O) de 170 kg/ha para 80 kg/ha, mantendo níveis similares de produtividade [CGEE (2005)]. A propósito, para a produção do bioetanol, interessam da cana apenas seus açúcares e sua fibra, constituídos de carbono, hidrogênio e oxigênio. Na medida do possível, todos os demais nutrientes retirados pela cana devem retornar ao solo.

Além disso (e particularmente interessante), tem sido observada nos canaviais uma disponibilidade de nitrogênio bem superior aos eventuais aportes com fertilizantes, sinalizando a existência de mecanismos de fixação biológica de nitrogênio (FBN) por colônias de bactérias do gênero *Azospirillum*, microrganismos diazotróficos (capazes de converter o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis por outros organismos), de vida livre na região dos rizomas ou associados a gramíneas como a cana. Os estudos pioneiros nessa área foram conduzidos nas últimas décadas por Johanna Döbereiner, grande cientista brasileira e pesquisadora da Embrapa, e podem abrir perspectivas de significativos incrementos de produtividade para a agroindústria da cana [CNPAB (2008)].

Considerando as culturas com áreas plantadas superiores a um milhão de hectares, a cana-de-açúcar situa-se atualmente em quarto lugar no consumo de adubos químicos no Brasil, como apresentado no Gráfico 24, preparado com base em dados da Associação Nacional de Difusão de Adubos (Anda) e levantamentos do IBGE. Esse nível de consumo de fertilizantes da cana pode ser considerado relativamente baixo, quando comparado a outros países. Frente aos valores sugeridos pelo CTC para a adubação da cana-soca e da cana-planta na Região Centro-Sul, com a aplicação de, respectivamente, 290 kg e 260 kg de uma fórmula média $N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$, os níveis de adubação adotados para a cana na Austrália são 30% e 54% maiores do que no Brasil [Donzelli (2005a)].

A adubação complementar aos subprodutos reciclados é importante para assegurar a produção dos canaviais nas condições atuais, sem a qual os níveis de produtividade cairiam de

modo expressivo. Entretanto, o consumo de fertilizantes representa uma parcela relevante dos custos agrícolas, o que justifica a crescente adoção de novas tecnologias para tentar diminuir a demanda de adubos e calcário, racionalizando seu uso. Assim, podem ser citadas formas inovadoras de distribuição de fertilizantes com redução das perdas por volatilização e o incremento da matéria orgânica com a colheita da cana crua [Gaval et al. (2005)], bem como a agricultura de precisão, de grande potencial. Mediante o emprego de mapas de produtividade, com os atributos físicos e químicos do solo (granulometria, níveis de macronutrientes e micronutrientes, acidez, densidade e resistência à penetração), expressivas economias de fertilizantes podem ser obtidas ao substituir a aplicação uniforme de adubos pela aplicação em taxas variadas, de acordo com as informações detalhadas do solo. A aplicação da agricultura de precisão na Usina Jales Machado, em Goianésia (GO), mostrou uma redução de 34,5% na aplicação de calcário e 38,6% na aplicação de fósforo, o que significa uma economia de 36% no custo correspondente a esses produtos, por hectare adubado, mantendo-se a produtividade [Soares (2006)]. Estudos experimentais na região de Araras, em São Paulo, indicaram que podem ser esperadas reduções de 50% no consumo de fertilizantes fosfatados e potássicos com a adoção de taxas variáveis de aplicação [Cerri (2005)] e estima-se que, atualmente, cerca de 10% das lavouras de cana no Brasil já utilizem alguma forma de agricultura de precisão para aplicar fósforo e calcário em taxas variadas (Molin, 2008).

***Gráfico 24* – Consumo de fertilizantes pelas principais culturas no Brasil**

Fonte: Donzelli (2005a).

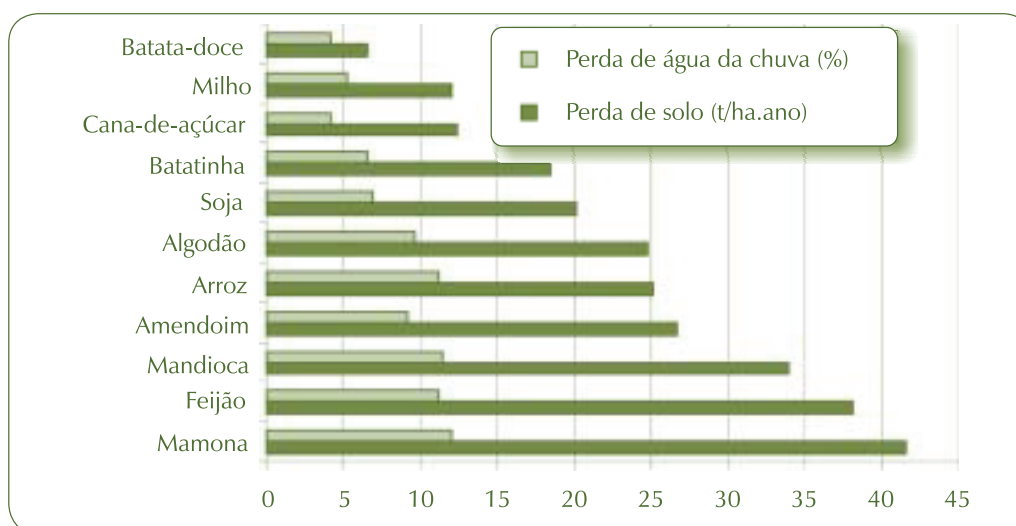
Em síntese, o uso de fertilizantes, de grande importância para a produtividade dos canaviais brasileiros, tem sido praticado em taxas reduzidas pela reciclagem de nutrientes do processo industrial e o aporte de fertilizantes convencionais tende a diminuir com a progressiva introdução das novas tecnologias disponíveis para adubação.

Erosão e proteção do solo

Provocado freqüentemente por práticas agrícolas inadequadas, o processo erosivo é a maior causa da degradação das terras agrícolas e associa-se, muitas vezes, à perda irreversível de solo cultivável. Por esse motivo, a utilização produtiva das terras deve levar em conta o tipo de solo (textura, tipos de horizonte diagnóstico, taxa de infiltração de água), a declividade, o regime de chuvas e a cultura a ser instalada e estabelecer os talhões, estradas e as linhas de cultivo, para proteger a camada fértil do solo. Como a cultura da cana-de-açúcar é praticada há séculos no Brasil (em muitos casos, na mesma área), existem suficientes informações a respeito do seu impacto sobre a conservação do solo [Donzelli (2005b)].

Planta semiperene, característica que reduz o número de operações agrícolas, responsáveis por expor o solo às intempéries e facilitar a perda de sua camada fértil, a cana-de-açúcar é, reconhecidamente, uma cultura conservacionista, como pode ser observado no Gráfico 25, com dados de perda superficial de solo por ano e perda de água das chuvas para diferentes culturas praticadas no Brasil. Por exemplo, a perda de solo que ocorre nos canaviais é cerca de 62% do valor observado com a soja. Do ponto de vista da capacidade de reter a água da chuva, aspecto importante para a produção agrícola e para a proteção do solo, a cana mostra-se uma das mais eficientes culturas, como também é mostrado no Gráfico 25.

Gráfico 25 **– Perdas de solo e água das chuvas em algumas culturas no Brasil**

Batata-doce
Milho
Cana-de-açúcar
Batatinha
Soja
Algodão
Arroz
Amendoim
Mandioca
Feijão
Mamona
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45
Perda de água da chuva (%)
Perda de solo (t/ha.ano)

Fonte: Donzelli (2005b).

O uso crescente da colheita da cana crua, comentado em parágrafos anteriores, em que a palha protege o solo contra o impacto direto das gotas de chuva e do preparo reduzido, com menor mobilização do solo, deverá nos próximos anos melhorar ainda mais o nível de conservação de solos cultivados com cana-de-açúcar, significando uma redução de aproximadamente 50% nas perdas de solo e de água da chuva atualmente observadas [Donzelli (2005b)].

Biodiversidade

A produção eficiente de bioetanol de cana-de-açúcar impõe o plantio de canaviais, monocultura cujo impacto ambiental depende das características originais do terreno ocupado e da adoção de práticas atenuadoras. Assim, no que se refere ao comprometimento da biodiversidade preexistente, certamente são distintos os efeitos do plantio da cana em áreas anteriormente ocupadas por outras culturas ou pela pecuária extensiva, frente ao plantio em áreas de formações nativas, especialmente de caráter florestal. Nos primeiros casos, ocorre uma substituição de usos do solo, enquanto, no segundo caso, podem existir impactos negativos relevantes.

A legislação brasileira (em particular, o Código Florestal Brasileiro, Lei 4.771, de 1965, e a Lei 7.803, de 1989) determina que, nas propriedades agrícolas, se preserve uma Reserva Legal (RL) – área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural, excetuada a de preservação permanente, necessária ao uso sustentável dos recursos naturais, à conservação e à reabilitação dos processos ecológicos, à conservação da biodiversidade e ao abrigo e à proteção de fauna e flora nativa –, com no mínimo 20% da área total, dependendo da região (na Amazônia, é 80%), e que sejam mantidas com a vegetação original as Áreas de Preservação Permanente (APP) – áreas nos topos de morros, encostas e margens de corpos d’água.

Infelizmente, a expansão das fronteiras agrícolas nas últimas décadas, de modo geral, ignorou essas disposições. Atualmente, por conta da maior consciência ambientalista, do reforço do aparato institucional nesse campo e da disponibilidade de sistemas de monitoramento com imagens de satélite, como mostrado na Figura 26, tais determinações legais vêm sendo cobradas por entidades governamentais em vários níveis e têm sido incorporadas à pratica agrícola de diversas usinas, tanto as já existentes anteriormente quanto as que estão em fase de implantação. Como exemplo do primeiro caso, em muitas usinas no Estado de São Paulo foram observadas durante a última década a redução do plantio de cana em áreas de matas ciliares (ripárias) e a recomposição florestal em nascentes, de modo que, mesmo com a significativa expansão das atividades agrícolas, percebe-se um incremento marginal da cobertura florestal no estado, estimada em 3,5 milhões de hectares [Instituto Florestal (2004)]. As APPs, em São Paulo, correspondem a 8,1% da área cultivada em cana, sendo que 3,4% são matas ciliares regeneradas. Já para as novas unidades, especialmente no cerrado, a preocupação em atuar de modo ambientalmente correto é evidente em muitas empresas, que buscam, desde o início de suas atividades, respeitar a legislação referente às Áreas de Preservação Permanente e às Reservas Legais, motivados pela redução dos riscos legais e pelos ganhos de imagem associados a uma atuação ambientalmente responsável.

Figura 26 **– Exemplo de imagem de satélite utilizada no monitoramento da cobertura vegetal**

Fonte: CTC (2008).

Mesmo sendo menos agressiva do que outras culturas e embora utilize técnicas como a reciclagem de subprodutos e o controle biológico de pragas, tendo em vista a magnitude das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, é essencial que a agroindústria do bioetanol respeite de modo estrito a legislação ambiental e seja devidamente penalizada por eventuais desvios. A experiência corrente em muitas usinas brasileiras, com bons resultados na relação agroindústria/ambiente, e a atual disponibilidade de tecnologias agrícolas e industriais de baixo impacto ambiental confirmam a possibilidade de produzir bioetanol de cana-de-açúcar de modo racional, já que a adoção de práticas ambientais conservacionistas se mostra economicamente interessante [Smeets et al. (2006)].

Entretanto, é muito importante observar que a efetiva aplicação da legislação e a difusão de uma postura mais favorável ao ambiente natural, em todos os aspectos já comentados, como biodiversidade, recursos hídricos e solo, decorrem, acima de tudo, da presença clara e ativa do Estado, implementando e fiscalizando a aplicação da legislação ambiental. Corrobora e pressiona nesse sentido a maior consciência ambientalista, que se manifesta através de entidades públicas e privadas e se coloca de forma clara a favor do desenvolvimento responsável da bioenergia no país, sempre que se mostrar como uma das poucas alternativas efetivamente capazes de alterar, para melhor, o preocupante *status quo* energético global [FBDS (2005)].

Outros aspectos ambientais

Recentemente, duas novas questões ambientais relacionadas com a produção de bioetanol de cana-de-açúcar têm sido apresentadas: a emissão de gases de efeito estufa associada à mudança do padrão de uso do solo, com a perda de sua cobertura original, quando da implantação dos canaviais, e o processo indireto de desmatamento causado pela ocupação das áreas de pastagens pela cana, que determina a transferência dos rebanhos para as fronteiras agropecuárias, onde seriam formadas novas áreas de criação. Com certeza, são temas complexos, ainda em discussão, mas a seu respeito podem ser adiantadas algumas informações importantes.

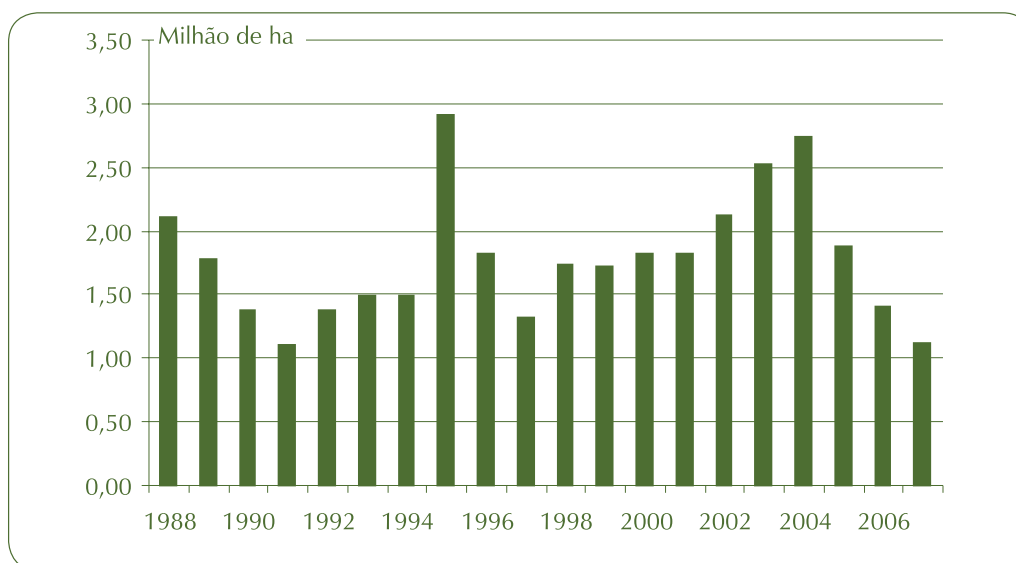
O impacto da mudança do uso da terra, determinada pela produção de matéria-prima para biocombustíveis, nas emissões de gases de efeito estufa tem sido considerado em alguns estudos. Dependendo da vegetação anterior na área utilizada para a produção do biocombustível, a perturbação provocada pela mudança do uso do solo poderia liberar para a atmosfera uma quantidade de carbono, antes "aprisionado" na vegetação e no solo, eventualmente alta o bastante para comprometer o seu benefício ambiental. Contudo, existe ainda muita incerteza quanto à magnitude desse efeito, porque os teores de carbono no solo em condições de equilíbrio dependem, entre outros fatores, da cultura, do tipo de solo, dos tratos culturais do clima local. Também as taxas de liberação e acúmulo de carbono, posteriores ao plantio regular da matéria-prima, dependem de muitos fatores. Avaliações desse tipo de impacto apresentam o bioetanol produzido com base na cana-de-açúcar no cerrado brasileiro como a alternativa de menor impacto entre os biocombustíveis estudados [Fargione (2008)], mas são resultados preliminares. Essa é uma área que merece atenção, e mais pesquisas ainda são necessárias para estimar, de modo consistente, a real parcela dessas emissões no ciclo de vida dos biocombustíveis.

Além disso, no caso do bioetanol no Brasil, é pouco provável que possam ser associadas perdas de cobertura florestal à produção de bioetanol, já que a expansão da lavoura canavieira tem ocorrido basicamente em áreas antes ocupadas por pastagens de baixa produtividade ou culturas anuais destinadas em grande parte à exportação, como a soja, casos em que o sistema radicular e a biomassa sobre o solo são, geralmente, de menor magnitude do que no caso da cana. Outro aspecto a ser levado em conta é o efeito do incremento da colheita de cana crua, na qual maior quantidade de palha e, portanto, de carbono é incorporada ao solo [Macedo (2008)].

A outra questão, o desmatamento indiretamente induzido pela expansão da cultura da cana-de-açúcar, comporta um argumento dificil de sustentar na crítica ao bioetanol, pois há poucos indícios dessa causalidade, que, entretanto, merece ser comentada. As florestas tropicais em todo o planeta sofrem uma enorme pressão pela utilização, racional ou não, de seus recursos madeireiros e pela possibilidade de dar espaço a novas frentes de ocupação agropecuária. No Brasil, país dotado de grandes extensões cobertas por florestas nativas, o processo de desmatamento é secular e lograr sua efetiva redução ainda é um dos maiores desafios, apesar

dos crescentes esforços governamentais para ordenar o processo de ocupação da Amazônia, com a definição de áreas de proteção, o aumento da fiscalização, a coordenação da atividade de diversos órgãos e a utilização de tecnologia moderna (como sensoriamento remoto).

A perda de cobertura florestal na Amazônia brasileira alcançou uma média anual de 1,8 milhões de hectares entre 2000 e 2006 e tem diminuído ultimamente, como mostrado no Gráfico 26 para a Amazônia Legal, com base nos resultados do acompanhamento por imagens de satélites, embora, apenas ao longo dos próximos anos, seja possivel confirmar se as taxas de desmatamento foram realmente contidas [Inpe (2008)]. Estima-se que cerca de 17% da cobertura original da floresta amazônica foram derrubados, principalmente para exploração madeireira, produção de carvão vegetal para siderurgia e dando origem a terrenos ocupados por sistemas extensivos de criação de gado bovino de corte e plantações de soja [ISA (2008)].

***Gráfico 26* – Desmatamento anual na Amazônia brasileira**

Fonte: Inpe (2008).

A área desmatada na Amazônia brasileira durante a última década (1998–2007) é de 19 milhões de hectares, uma superfície cerca de dez vezes maior do que a expansão observada na área plantada em cana para produzir bioetanol no mesmo período. A produção de bioetanol não implica desmatamento, cuja problemática complexa impõe o ordenamento da expansão das atividades agropecuárias, na região amazônica, e o reforço das medidas de fiscalização e execução legal. O Brasil, assim como diversos outros países situados na região tropical úmida

do planeta, possui terras disponíveis para uma expressiva expansão da produção agrícola, podendo produzir de forma sustentável alimentos e bionergia, sem precisar abrir mão de seu patrimônio florestal, como se discute em mais detalhes no próximo tópico.

7.2 Uso do solo

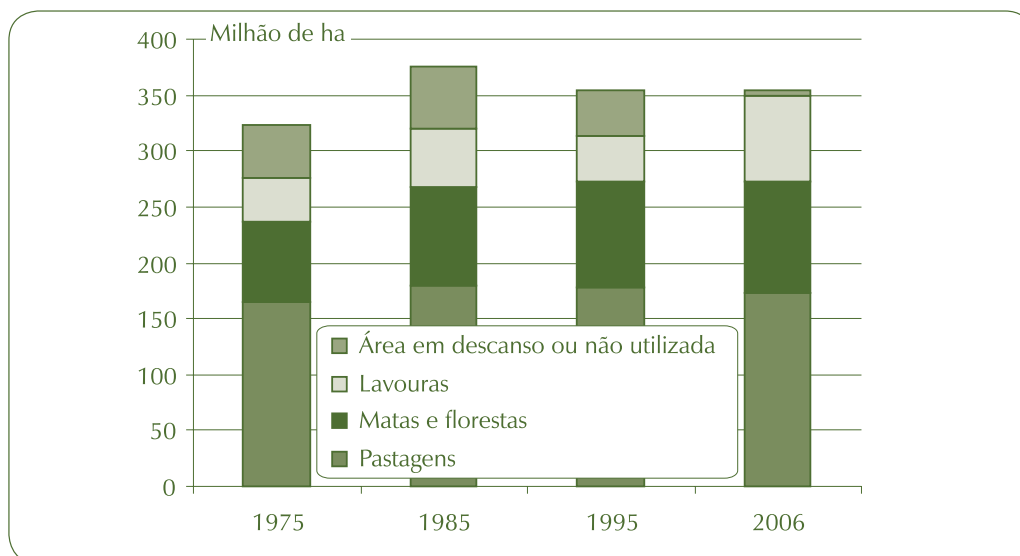
Um tema recorrente na discussão das perspectivas para o bioetanol é a questão do uso das terras agrícolas, em relação a sua disponibilidade e o eventual impacto sobre a disponibilidade de alimentos. Este tópico analisa esses aspectos do ponto de vista da produção de bioetanol de cana-de-açúcar no Brasil, avaliando na seqüência a evolução do uso das terras agrícolas durante as últimas décadas. Apresentam-se ainda as perspectivas do zoneamento agroecológico e conclui-se com uma visão do potencial estimado para a expansão da cultura canavieira no país.

No capítulo seguinte, serão analisadas as ligações entre a produção bioenergética e a segurança alimentar, desde uma perspectiva global, considerando não apenas o Brasil, mas incluindo a produção de outros combustíveis.

Evolução do uso de terras agrícolas no Brasil

O Brasil possui uma superfície total de 851,4 milhões de hectares, em grande parte coberta por florestas tropicais. Com base nos resultados do Censo Agropecuário de 2006, a área das propriedades rurais brasileiras – que exclui áreas protegidas, corpos d´água e áreas inaptas para agricultura e inclui as reservas legais de formações nativas – soma 354,8 milhões de hectares (42% da área total do país), dedicados a pastagens naturais e plantadas, silvicultura, florestas nativas e lavouras perenes e anuais. A evolução dos diversos tipos de uso do solo nos últimos 30 anos pode ser observada no Gráfico 27, no qual se destacam a variação relativamente pequena da área total das propriedades e a significativa expansão das áreas de lavoura no decênio passado.

Entre 1995 e 2006, a agricultura brasileira cresceu 83,5% e passou a ocupar 76,7 milhões de hectares, cerca de 9% da área nacional. Tal crescimento se deu, essencialmente, sobre as áreas não utilizadas ou em descanso e, em menor grau, sobre a área das pastagens, que se reduziram em 5,4 milhões de hectares, passando a representar cerca de 20% do território brasileiro. Esse processo de crescimento da agricultura na área das pastagens vem ocorrendo de modo sistemático desde os anos 1970 e fez a relação da área dos pastos sobre a área das lavouras reduzir-se de 4,5, em 1970, para 2,2, em 2006.

***Gráfico 27* – Uso da terra nas propriedades rurais no Brasil**

Fonte: IBGE (2007).

Em 2007, o cultivo de cana no Brasil ocupou 7,8 milhões de hectares, cerca de um terço da superfície ocupada pela soja e metade da área cultivada com milho, como mostrado no Gráfico 28. Aproximadamente metade da cana produzida se destina à fabricação de bioetanol. Portanto, os canaviais para a produção de combustíveis, no Brasil, correspondem a 5% da área cultivada, a 1% da área das propriedades agrícolas, a 2,3% das áreas dedicadas a pastagens e a 0,5% da superfície do país. Contribuem para a magnitude desses números tanto a extensão territorial do país como o bom desempenho da cana na captação de energia solar, pois quaisquer outras matérias-primas, com as tecnologias atuais, demandariam maior extensão nos terrenos de cultivo. Uma representação da importância relativa da área dedicada à cultura da cana para fins energéticos, frente às áreas total e agricultada do país, é apresentada no Gráfico 29.

O expressivo crescimento da área plantada em cana observado no Centro-Oeste, entre 1998 e 2007, confirma a tendência da agroindústria de expandir-se nas regiões próximas às áreas tradicionalmente produtoras e que apresentem topografia e condições edafoclimáticas adequadas. Embora ainda devam ser equacionadas as carências de infra-estrutura, especialmente de transporte, essa região passa a constituir um novo e importante eixo para a agroindústria canavieira no Brasil. Nessa região, a expansão de cana-de-açúcar tem ocorrido em substituição de pastagens e, eventualmente, de campos de soja, que há algumas décadas tinham substituído o cerrado original.

Gráfico 28 – Evolução da área utilizada pelas principais culturas no Brasil

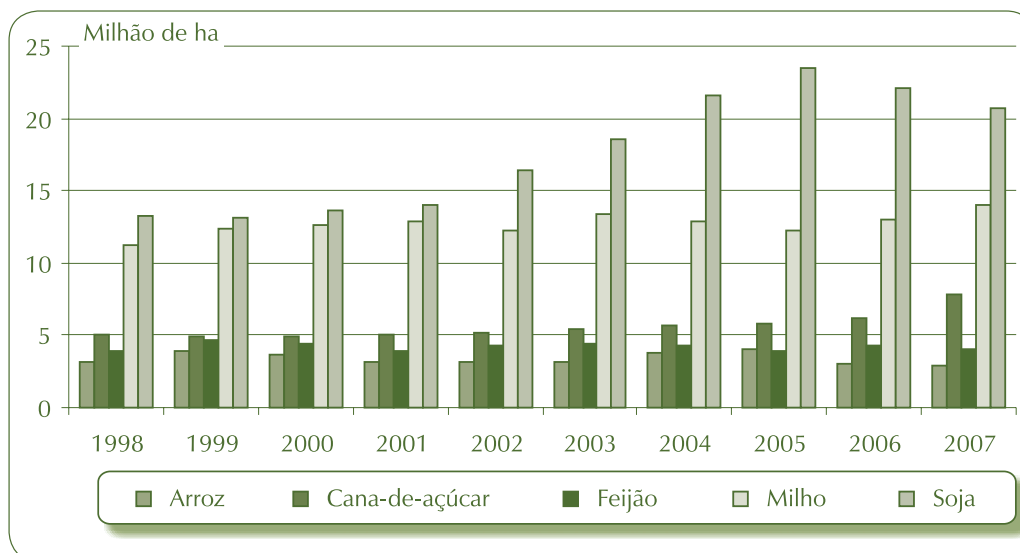
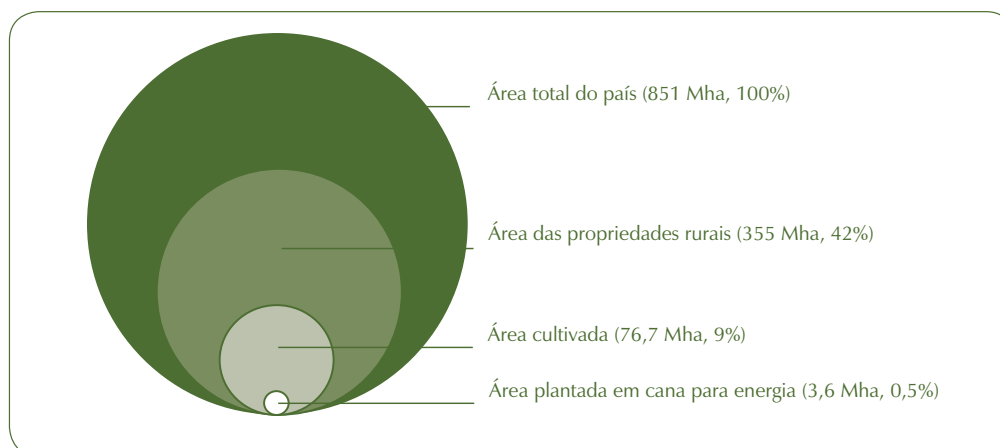
Milhão de ha
25
20
15
10
5
0
1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007
Arroz Cana-de-açúcar Feijão Milho Soja

Fonte: IBGE (2007).

Gráfico 29 – Uso da terra no Brasil

Fonte: IBGE (2007).

Zoneamento agroecológico

Visando ordenar a expansão da agroindústria da cana no Brasil, foi desenvolvido em 2008, sob a coordenação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (ZAE-Cana), cujos primeiros resultados deverão estar disponíveis ainda neste ano. Trata-se de um estudo de envergadura, liderado pela Embrapa Solos, envolvendo dezenas de instituições e pesquisadores, com o propósito de definir, indicativamente, as áreas aptas e as regiões para as quais não se recomenda essa cultura em grande escala. O zoneamento deve ser utilizado como instrumento norteador de políticas de financiamento, investimentos em infra-estrutura e aperfeiçoamento do marco tributário, bem como pode servir para eventuais certificações socioambientais que venham a ser estabelecidas no futuro [Strapasson (2008)].

Com foco nas áreas agrícolas e de pecuária nas quais a cana ainda não é cultivada, mas apresenta aparente potencial, o zoneamento agroecológico cruza informações de mapas de solo, de clima, de áreas de reserva ambiental, geomorfológicos e topográficos, identifica o uso da terra atual, examina a legislação ambiental federal e estadual e dados agronômicos da cana-de-açúcar, como temperaturas ideais para seu crescimento, tipos de solo em que ela melhor se adapta, necessidades hídricas etc. Dessa forma, definem-se e classificam-se as áreas de maior potencial, onde se deve plantar cana, e as áreas onde não se pode ou não se recomenda esse cultivo. Como condicionante nesse trabalho, estabeleceu-se um patamar mínimo de produtividade, determinado pela média nacional de 70 toneladas por hectare de cana.

Potencial de expansão da cultura de cana-de-açúcar no Brasil

Menos detalhado que o zoneamento agroecológico em desenvolvimento pelo Mapa, mas com objetivo similar de examinar as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de bioetanol, visando à substituição parcial de gasolina em escala global, o estudo desenvolvido pelo Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE) com o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (Nipe) da Universidade Estadual de Campinas, efetuou um levantamento das áreas com potencial para produção de cana, com auxílio de mapas de solos e mapas climáticos, considerando as disponibilidades hídricas e as declividades dos terrenos (menos do que 12º, para facilitar a colheita mecanizada), as áreas protegidas ou de preservação, como o Pantanal e a Floresta Amazônica, e as áreas de reservas florestais e indígenas [CGEE (2005)]. Os resultados desse estudo são mostrados nas Figuras 27 e 28, com as áreas classificadas de acordo com sua aptidão para a cultura da cana, respectivamente sem irrigação e considerando a irrigação de salvação, assim denominada por ser utilizada apenas nos canaviais em formação, contexto em que o incremento de produção é um objetivo secundário, sendo aplicadas lâminas de água inferiores a 200 mm, nos períodos de déficit hídrico mais crítico (equivalente a um aporte de água de menos de 2.000 m^3/ha.ano).

Figura 27 – **Potencial para o cultivo da cana sem irrigação**

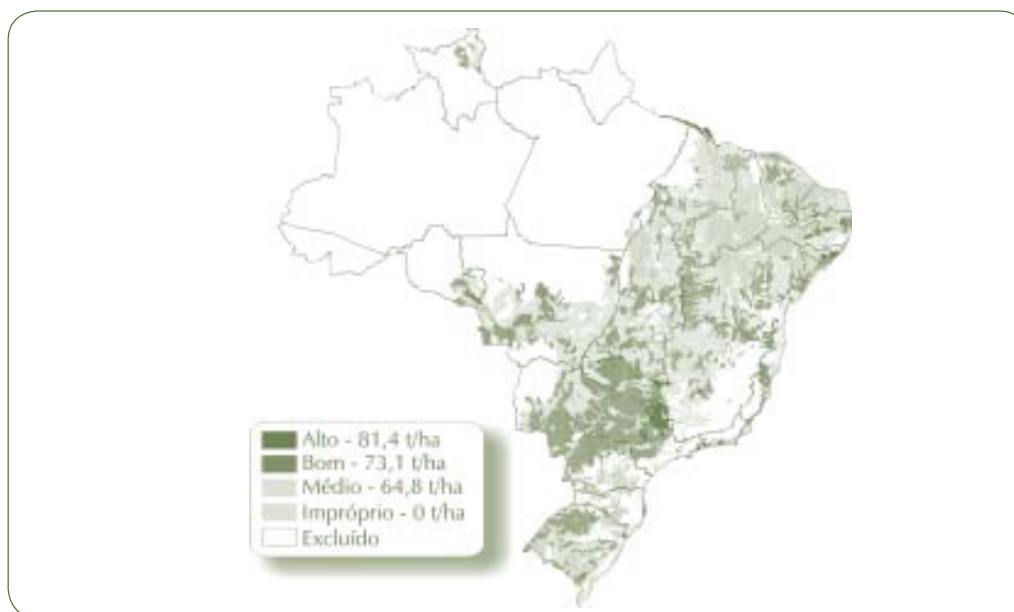
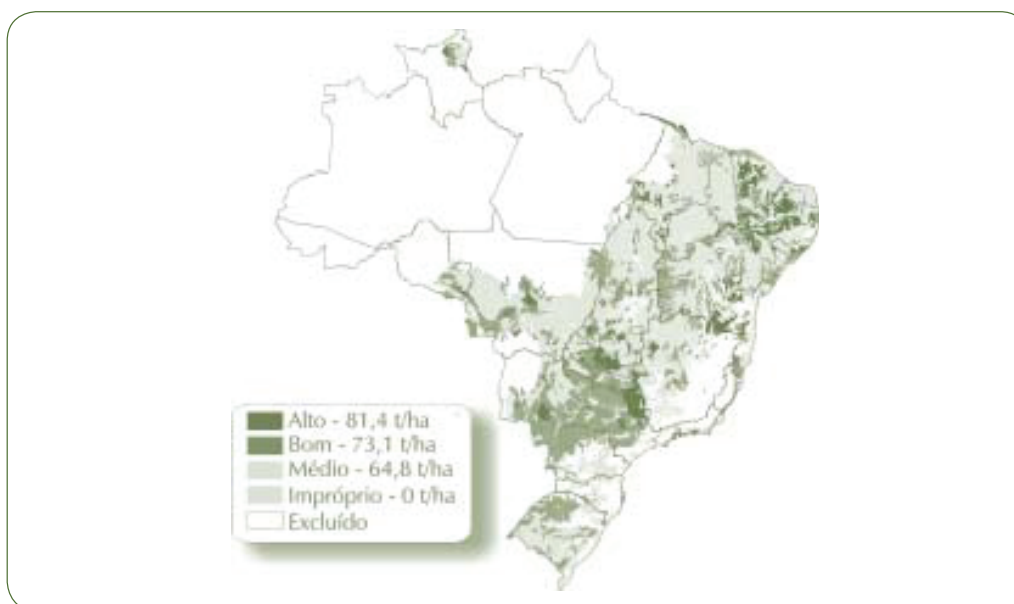
Alto - 81,4 t/ha
Bom - 73,1 t/ha
Médio - 64,8 t/ha
Impróprio - 0 t/ha
Excluído

Fonte: CGEE (2005).

Figura 28 – **Potencial para o cultivo da cana com irrigação de salvação**

Fonte: CGEE (2005).

No mapa de potencial de plantio de cana sem irrigação (Figura 27), grande parte das regiões com áreas de alto e médio potencial, equivalentes a 121,8 milhões de hectares (33,7% do total), estão localizadas no Centro-Sul do Brasil. Essas áreas, sem importantes restrições de solos ou clima, apresentam relevo plano ou suavemente ondulado. Por outro lado, quando é considerada a aplicação da irrigação de salvação, no mapa apresentado na Figura 28, as áreas de alto e médio potencial passam a 135,9 milhões de hectares (37,6% do total), percebendo-se, nesse caso, uma mudança expressiva do potencial de produção da região do semi-árido nordestino [CGEE (2005)].

Uma síntese desses resultados é apresentada na Tabela 31. Cabe ressaltar que, nessa classificação de produtividade esperada, o valor definido de 65 t/ha para baixo potencial é a média mundial de produtividade da cultura de cana, por isso podem ser também considerados para fins de expansão dessa cultura mais 167,5 Mha (46,4 %) do total.

Assim, a expansão da agroindústria do bioetanol, dentro de cenários de significativo crescimento, pautada por condicionantes de respeito às áreas protegidas e assegurada uma produtividade motivadora, não enfrenta, no caso brasileiro, restrições significativas em termos de disponibilidade de terras. Nesse sentido, as estimativas apresentadas a seguir ajudam a reforçar o argumento.

Tabela 31 **– Potencial para produção de cana-de-açúcar no Brasil**

Potencial	Produtividade esperada (t/ha)	Área com potencial de utilização			
		Sem irrigação		Com irrigação	
		Milhão de ha	%	Milhão de ha	%
Alto	> 80	7,90	2,2	37,92	10,5
Médio	>73	113,90	31,5	98,02	27,1
Baixo	> 65	149,22	41,3	167,65	46,4
Impróprio	< 65	90,60	25,1	58,00	16,0
Total	–	361,62	100,0	361,59	100,0

Fonte: CGEE (2005).

Como um exercício das potencialidades existentes, considerando os valores globais da safra 2007/2008, foram produzidos, no Brasil, cerca de 22 bilhões de litros de bioetanol em 3,6 milhões de hectares. Baseado nesse dado empírico, para promover, nas condições atuais, a adição de 10% de álcool anidro em toda a gasolina consumida no mundo (1,3 bilhão de metros cúbicos), seriam necessários 136,5 bilhões de litros de bioetanol, cuja produção, nas condições brasileiras, demandaria 23 milhões de hectares, área equivalente à atualmente ocupada pela soja no país. Em condições similares de produtividade e eficiência energética, essa produção poderia ser distribuída nas diversas regiões tropicais úmidas do planeta, localizadas na América Latina e Caribe, África e Ásia, onde, por tradição, se pratica a cultura da cana-de-açúcar, como comentado no Capítulo 3 e mostrado na Figura 29. A produção de biocombustiveis com base em outras matérias-primas ou por quaisquer outras rotas tecnológicas atualmente disponíveis exigiria superfícies cultivadas bem superiores.

Figura 29 – **Áreas cultivadas na cultura da cana-de-açúcar**

Fonte: Adaptado de Tetti (2005).

Em uma visão prospectiva, com base em cenários que consideram a produção em *clusters* (agrupamento de unidades produtoras de etanol), a existência de logística suficiente e as necessidades de área para outras culturas agrícolas permanentes e temporárias, no horizonte de 2025, o estudo do CGEE indica uma disponibilidade efetiva de 80 milhões de hectares de terras para expansão da cultura canavieira no Brasil. Em termos de demanda, esse mesmo estudo estimou em 205 bilhões de litros o volume de bioetanol necessário para substituir 10% do consumo mundial de gasolina projetado para 2025. Assumindo dois níveis de mistura de bioetanol na gasolina consumida globalmente (5% e 10%) e dois cenários tecnológicos (atual e melhorado), foram estimados os requerimentos de área para atender o mercado brasileiro e global de açúcar e de bioetanol, levando em conta ainda que 20% da área deve ser mantida como reserva ambiental, com os resultados resumidos na Tabela 32 [CGEE (2005)].

Os ganhos de produtividade na agroindústria canavieira, que devem continuar sendo alcançados, e a introdução de tecnologias inovadoras para produção de biocombustível poderão reduzir a área requerida nos cultivos energéticos de modo relevante. Na Tabela 32, a última linha apresenta as áreas requeridas para, considerando a evolução tecnológica, atender em 2025, respectivamente, a demanda interna e associada à exportação de açúcar (4 Mha), bem como produzir bioetanol suficiente para atender ao mercado interno (6 Mha) e promover a mistura de 10% de bioetanol no consumo global de gasolina (30 Mha), com uma necessidade total de 40 Mha, incluindo a área a ser reservada para proteção ambiental (8 Mha). Essa área representa a metade das áreas disponíveis no Brasil para produção bioenergética, indicando que a disponibilidade de terras em condições adequadas não parece ser o limitante para promover de modo racional a produção de bioetanol para consumo interno e exportação nas regiões de produção [CGEE (2005)].

Tabela 32 **– Demanda de áreas para produção de bioetanol visando o mercado global em 2025**

Cenário	Consumo global de etanol (Mm^3/ano)	Tecnologia	Área necessária à cana (Mha) para:				Uso da terra disponível (Em%)
			Produção de açúcar: mercado interno e exportação	Produção de bioetanol		Área requerida total	
				Mercado interno	Exportação		
E5	102,5	Atual	4,5	8,5	19,0	32	40
		Melhorada	4,0	6,0	15,0	25	31
E10	205,0	Atual	4,5	8,5	38,0	51	64
		Melhorada	4,0	6,0	30,0	40	50

Fonte: CGEE (2005).

7.3 Viabilidade econômica do bioetanol de cana-de-açúcar

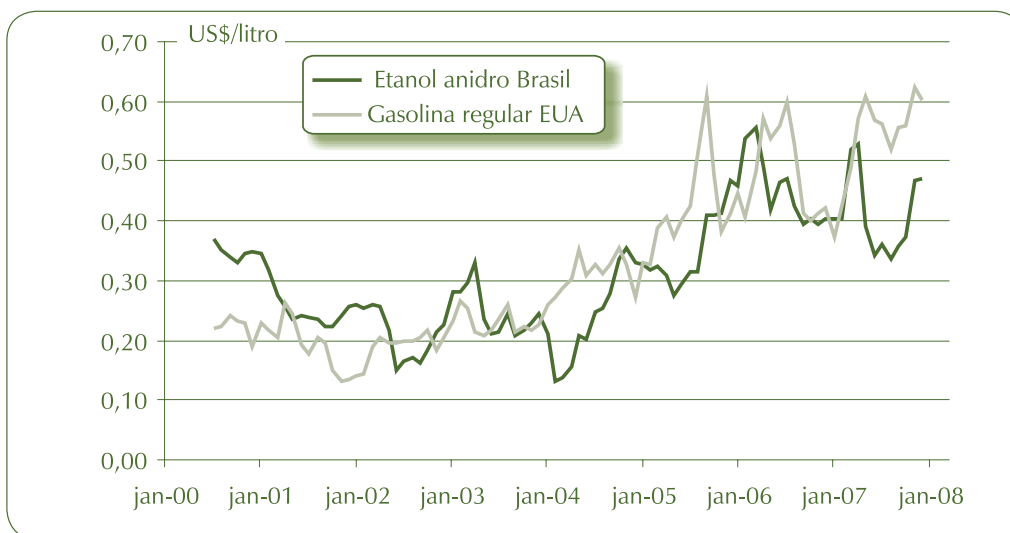
Para a sustentabilidade da produção de bioetanol, é fundamental que os custos de sua produção, compreendendo toda a atividade agroindustrial e os custos associados aos investimentos na formação do canavial e na implantação da unidade industrial, sejam cobertos pelos resultados econômicos dessa agroindústria. Em capítulos anteriores, alguns aspectos econômicos foram comentados, como os mecanismos de formação de preços, a competitividade do bioetanol frente à produção de açúcar, a relevância econômica do setor sucroalcooleiro e a curva de aprendizagem indicando uma sustentada redução de custos ao longo das últimas décadas. A seguir, retoma-se a análise da economicidade do bioetanol, apresentando aspectos da competitividade frente ao petróleo, a estrutura de custos do bioetanol no Brasil e as perspectivas da evolução do preço desse biocombustível nos próximos anos. É importante reconhecer que, nos últimos anos, tem sido observada uma significativa volatilidade nos preços e nas taxas de câmbio, o que torna a análise de custos e preços uma tarefa difícil. Entretanto, para as conclusões gerais pretendidas, os resultados apresentados a seguir são suficientemente representativos.

O baixo custo de produção do bioetanol de cana-de-açúcar no Brasil é um fato bem conhecido. Em diversas fontes, estima-se que, incluídos todos os insumos e fatores, seu custo esteja entre 0,25 US$/litro e 0,30 US$/litro, correspondentes ao petróleo precificado entre 36 US$/barril e 43 US$/barril. Essa estimativa assume o preço da gasolina 10% acima do valor do óleo bruto em volume e sua substituição pelo bioetanol anidro com paridade em base volumétrica, um pressuposto consistente, em especial quando se assume o uso do bioetanol em misturas como E10. Sob tais condições, é patente a viabilidade do uso de bioetanol em

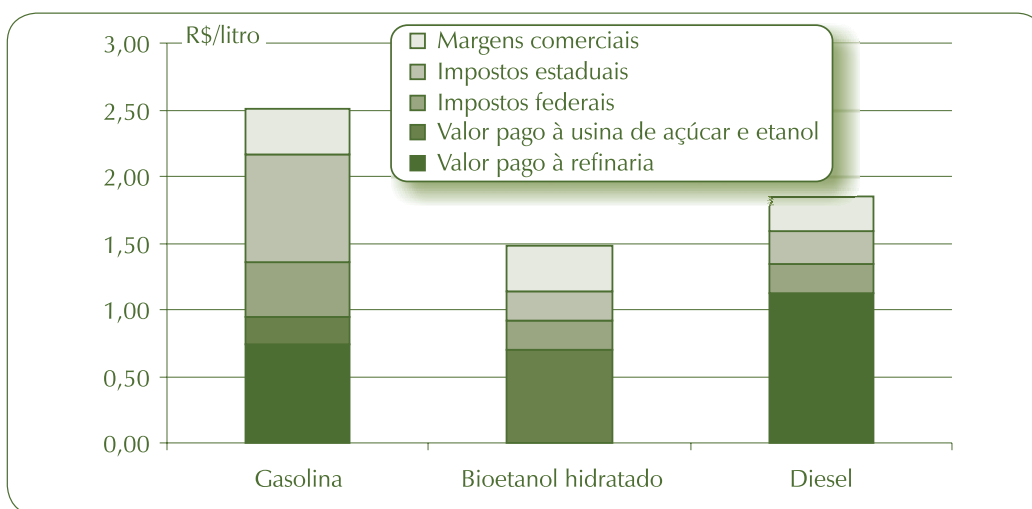
substituição à gasolina, mas uma confirmação mais cabal da vantagem desse biocombustível surge ao comparar preços sem tributos nas unidades de produção.

O Gráfico 30 mostra como evoluíram os preços pagos aos produtores de bioetanol de cana-de-açúcar e de gasolina, sem fretes e sem tributos, respectivamente referidos ao preço do bioetanol anidro no Estado de São Paulo informado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, e o preço livre (*spot*) da gasolina regular na costa do Golfo do México (U.S. Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB), informado pela Energy Information Administration dos EUA (EIA, 2008). O Cepea acompanha regularmente os preços das negociações de bioetanol anidro e hidratado em quatro estados brasileiros (São Paulo, Alagoas, Pernambuco e Mato Grosso), constituindo uma das mais confiáveis fontes de informações nesse mercado.

A adoção da moeda norte-americana permite comparar os preços nos EUA e no Brasil, mas deve ser tomada com cautela, tendo em vista a significativa desvalorização dessa moeda a partir de 2005, com uma queda de cerca de 30% em dois anos que tende a superestimar o valor do bioetanol produzido no Brasil. De toda maneira, como se pode concluir dessas curvas, nos últimos anos o bioetanol de cana-de-açúcar passou a apresentar preços mais atrativos do que a gasolina, ao nível do produtor, sem considerar qualquer tributo ou subsídio. Em poucas palavras, isso significa que, nessas condições, a adição de bioetanol anidro permite reduzir o preço médio do combustível colocado no mercado.

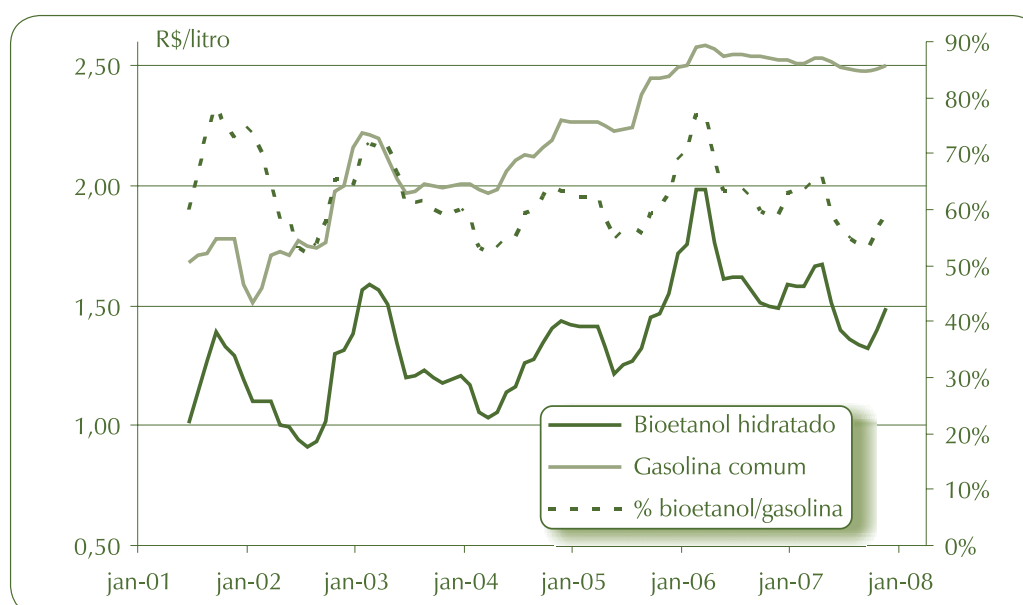
Gráfico 30 – Evolução dos preços pagos ao produtor, sem tributos, de gasolina nos EUA e de bioetanol de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: Valores tomados de Cepea (2008) e EIA (2008).

Nas condições brasileiras, a matriz de tributos federais e estaduais é diferenciada entre os vários combustíveis veiculares, por conta das implicações econômicas e das aplicações típicas de cada um deles, privilegiando o óleo diesel e os biocombustíveis. Assim, sobre a gasolina incide um nível mais elevado de tributos em comparação ao bioetanol hidratado, o gás natural veicular e o óleo diesel. Existe uma razoável variação das alíquotas nos tributos estaduais (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços – ICMS), mas, apresentando como valores de referência a situação no Rio de Janeiro em março de 2008, pode-se afirmar que os tributos, os fretes e as margens de comercialização que incidem sobre os preços dos produtores, para a gasolina, o bioetanol hidratado e o diesel elevam seu preço, respectivamente, em 239%, 112% e 63%, conforme mostrado no Gráfico 31. Observe-se nesse gráfico que o valor pago ao produtor de gasolina refere-se a um volume de 0,75 litro, já que o produto entregue ao consumidor apresenta 25% de etanol anidro.

***Gráfico 31* – Estrutura dos preços ao consumidor da gasolina comum, bioetanol hidratado e óleo diesel no Rio de Janeiro em março de 2008**

Fonte: Valores calculados com base em ANP (2007), Cepea (2008) e Petrobras (2008).

Outra forma de avaliar a atratividade do bioetanol frente aos combustíveis convencionais é comparando o preço médio de venda ao consumidor do bioetanol hidratado com o preço praticado para a gasolina comum. Assim, podem ser utilizados os levantamentos de preços de combustíveis, regularmente disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, aplicados em uma ampla amostra que cobre todo o território brasileiro [ANP (2007)]. Observando as séries de preços, constata-se que o bioetanol hidratado apresenta uma boa competitividade frente à gasolina, avaliada em custo por quilômetro percorrido, em função de seu menor preço, ao nível dos produtores, bem como da matriz tributária favorável, comentada no parágrafo anterior. No caso dos veículos *flexible fuel*, em

que o usuário opta pelo combustível que vai usar no momento de abastecer, o bioetanol é adotado, em geral, até um limite de 70% do preço da gasolina. Nesse contexto, observa-se que, durante a maior parte dos últimos anos, utilizar o bioetanol em vez da gasolina foi mais interessante, exceto durante poucos e curtos períodos de algumas semanas, como indicado no Gráfico 32. Nesse gráfico, também pode ser observado o padrão aproximadamente regular de variação dos preços, elevando-se ao final da safra e reduzindo-se com seu início em meados do primeiro semestre.

***Gráfico 32* – Evolução dos preços médios ao consumidor do bioetanol hidratado e da gasolina comum e da relação entre esses preços no Brasil**

Fonte: Elaborado com base em ANP (2007).

Os dados anteriores se referem a valores praticados nos mercados dos combustíveis, sinalizando de modo claro a competitividade do bioetanol para os consumidores. Apesar disso, é interessante avaliar os custos de produção desse biocombustível e verificar se os preços têm remunerado adequadamente os produtores. Durante muito tempo, no Brasil, os custos da agroindústria sucroalcooleira eram auditados pelo governo federal, que definia todos os preços ao longo da cadeia de produção e comercialização. Contudo, a partir da safra de 1998, iniciou-se o processo de liberação dessa agroindústria, concluído em 2002, conforme detalhado no capítulo anterior. Atualmente, os agentes econômicos decidem seus preços com liberdade baseados em estratégias mercadológicas, levando em conta estoques e perspectivas de evolução dos mercados do açúcar e dos combustíveis. Nesse ambiente competitivo, estimar custos é uma tarefa bastante complexa, pois, além da grande diversidade de situações,

com diferentes produtividades e tecnologias sendo utilizadas, o principal componente no custo do bioetanol é a matéria-prima, que pode ser produzida pela própria empresa processadora, em terrenos arrendados, ou cultivada por produtores independentes. A dificuldade de conhecer custos de produção de forma consistente não é característica apenas do mercado de bioetanol: de modo análogo, são pouco disponíveis os custos detalhados de produção para o petróleo e o gás natural.

No estudo desenvolvido pelo Nipe/Unicamp, foi estimado para a região Centro-Sul, em 2005, um custo médio de R$ 33,16 por tonelada de cana colocada no pátio da usina, desagregado conforme mostrado no Gráfico 33 [CGEE (2005)]. Nesse mesmo estudo, estima-se um custo de R$ 24,59 por tonelada de cana em Goiás, especialmente por causa do menor custo da terra.

A Associação Rural dos Fornecedores e Plantadores de Cana da Média Sorocabana (Assocana) fez uma avaliação mais recente dos custos de produção de cana-de-açúcar, considerando um ciclo de cinco cortes em seis anos e incluindo as atividades de implantação do canavial, preparo de solo, plantio, colheita e transporte, levando em conta todos os fatores de produção (insumos, equipamentos, terra, mão-de-obra) [Assocana (2008)]. Esse estudo estimou para abril de 2008 um custo médio de R$ 2.513,50 por hectare, para cada corte, resultando um custo médio da cana de R$ 35,00. Considerando a matéria-prima entre R$ 26,00 e R$ 35,00, uma taxa de câmbio de R$ 2,00 por US$ e uma produtividade industrial de 85 litros de bioetanol por tonelada de cana processada, resulta que a contribuição da matéria-prima para o custo do bioetanol é de US$ 0,153 a US$ 0,206 por litro. Esses valores parecem ser representativos dos atuais custos médios da Região Centro-Sul brasileira e situam-se bem acima dos US$ 0,12 por litro que usualmente se apontava como a parcela da matéria-prima no custo do bioetanol ao final dos anos 1990, embora caiba observar que esse preço foi bastante inflacionado nos últimos anos pelo incremento dos custos com equipamentos, fertilizantes e agroquímicos, entre outros. Do ponto de vista das aplicações alternativas dessa matéria-prima, o valor da tonelada de cana vai depender, naturalmente, dos preços do açúcar, que alcançou níveis de US$ 0,27 por litro de bioetanol equivalente em açúcar, em meados do ano passado.

Os custos referentes ao investimento industrial, à operação e à manutenção da unidade de processamento da cana e produção de bioetanol também se elevaram bastante nos últimos anos, especialmente por causa dos aumentos de preços dos equipamentos e materiais. O estudo desenvolvido pelo Nipe/Unicamp estimou que uma usina com capacidade anual de processamento de dois milhões de toneladas de cana-de-açúcar poderia custar cerca de US$ 97 milhões, correspondendo a custos de capital de US$ 0,13, estimados para uma taxa interna de retorno de 12% e uma relação dívida/capital de 50%, com 8% de taxa de juros e uma produção de 40 kWh de energia elétrica excedente por tonelada de cana processada, comercializados a US$ 57 por MWh. Para essa unidade, foram estimados custos de operação e manutenção (incluindo a depreciação) de US$ 0,07 por litro de bioetanol produzido, com a estrutura apresentada no Gráfico 34 [CGEE (2005) e Almeida et al. (2007)].

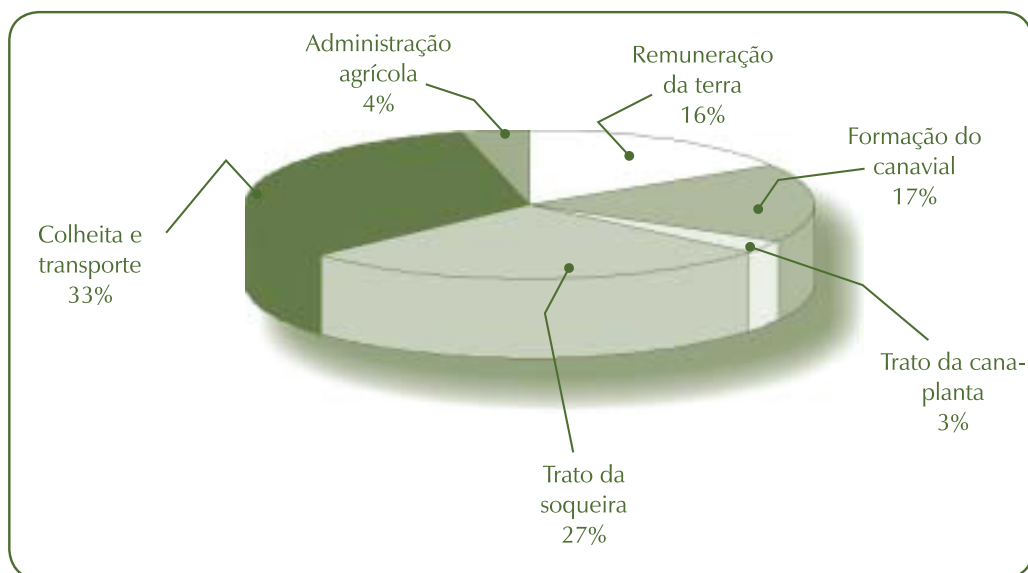
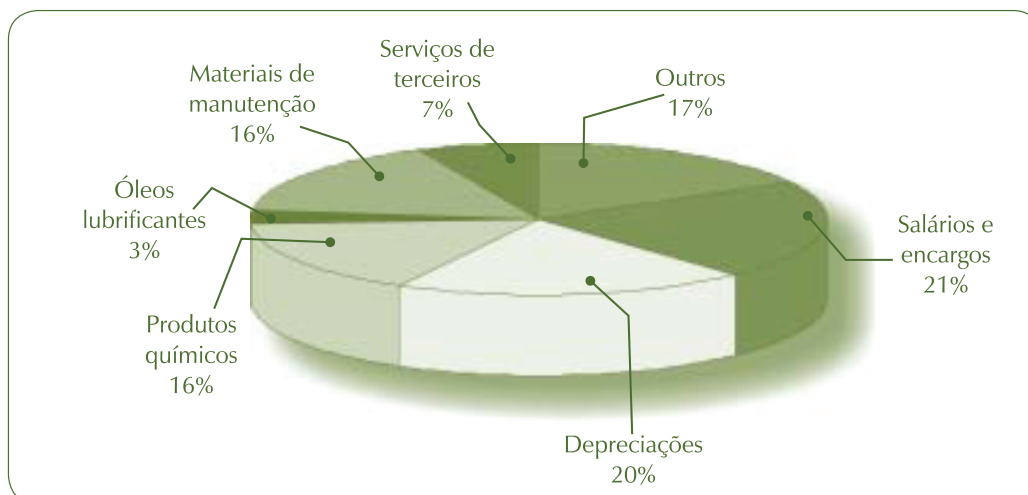
Gráfico 33 – Estrutura dos custos de produção da cana-de-açúcar no Centro-Sul em 2005

Fonte: CGEE (2005).

Gráfico 34 – Estrutura do custo de operação e manutenção de uma destilaria autônoma para produção de bioetanol de cana-de-açúcar no Centro-Sul em 2005

Fonte: CGEE (2005).

Dessa maneira, considerados todos os fatores – matéria-prima, operação, manutenção e investimento –, o custo do bioetanol de cana-de-açúcar situa-se entre US$ 0,353 e US$ 0,406 por litro de bioetanol, valores correspondentes ao petróleo entre US$ 50 e US$ 57 o barril equivalente.

É provável que, nas usinas em implantação nas novas fronteiras produtoras, os custos do bioetanol sejam inferiores, tendo em vista a localização dessas plantas, com maior densidade dos canaviais (menores custos de transporte) e o fato de serem dedicadas apenas à produção de biocombustível, reduzindo os custos da matéria-prima e os investimentos. Por outro lado, considerando as usinas mais antigas e completamente amortizadas, o bioetanol deverá apresentar menores custos de ordem financeira, do mesmo modo que níveis mais elevados de produção de energia elétrica com base no bagaço tendem a melhorar os indicadores dessa agroindústria, de modo geral. Outra ressalva importante se refere ao impacto da taxa de câmbio adotada, pois a expressiva valorização da moeda brasileira em anos recentes tem elevado bastante o valor dos produtos da agroindústria sucroalcooleira, quando avaliados em divisas.

Considerando as possibilidades de continuidade no processo de incremento da produtividade agrícola e industrial, apresentadas anteriormente, é razoável esperar que os custos de produção do bioetanol de cana-de-açúcar permaneçam estáveis ou se reduzam em termos relativos, enquanto, do lado dos combustíveis fósseis, os cenários esperados são de manutenção de preços elevados, sem perspectivas de redução aos níveis praticados há algumas décadas [IEA (2007)]. Portanto, do ponto de vista econômico, a produção de bioetanol de cana-de-açúcar apresenta-se sustentável, com preços e custos efetivamente viáveis, sem necessidade de subsídios para competirem com os combustíveis convencionais, desde já.

7.4 Geração de emprego e renda na agroindústria do bioetanol

A importante relação entre a produção de bioetanol de cana-de-açúcar e a demanda de mão-de-obra é um tema central sobre bioenergia no Brasil e certamente determinante para sua viabilidade social. A agroindústria canavieira é uma grande geradora de postos de trabalho: com base na Relação Anual de Informações Sociais (Rais), do Ministério do Trabalho e Emprego, e na Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios (PNAD), realizada periodicamente pelo IBGE, estima-se que em 2005 havia 982 mil trabalhadores diretamente e formalmente envolvidos com a produção sucroalcooleira [Moraes (2005)]. De acordo com um estudo baseado na Matriz Insumo-Produto da economia brasileira, em 1997, para cada emprego direto nesse setor, existem 1,43 emprego indireto e 2,75 empregos induzidos [Guilhoto (2001)], o que permite estimar para 2005 um total de 4,1 milhões de pessoas trabalhando de algum modo dependentes da atividade da agroindústria da cana, caso tenham se mantido essas relações. Esses postos de trabalho se distribuem de forma ampla em boa parte do território brasileiro e cobrem uma gama de competências e formações, mas, em sua maior parte, são empregos de baixa qualificação.

Com a evolução das tecnologias empregadas, observa-se menor crescimento dos requerimentos de pessoal, acompanhado de uma elevação da capacitação requerida e do aumento da qualidade do trabalho desenvolvido. Essa dinâmica tem motivado muitos estudos no âmbito da economia e da sociologia rurais, que fornecem uma visão abrangente dos processos em curso e de suas implicações. Nos próximos parágrafos, serão abordadas as questões associadas à geração de emprego e renda no âmbito da produção de bioetanol. Inicialmente, serão revisados os dados sobre os níveis de emprego e sua evolução recente, para se discutir, em seguida, suas perspectivas, em especial aquelas associadas à expansão da mecanização na colheita de cana.

No total de empregos diretos e formais da agroindústria sucroalcooleira, que se expandiu de forma expressiva nos últimos anos, como apresentado na Tabela 33, 63% se referem ao Centro-Sul, onde é produzida mais de 85% da cana brasileira, sinalizando maior produtividade do trabalho nessa região. Considerando esse quadro, o número de trabalhadores por unidade de produto na Região Nordeste é três a quatro vezes maior que os valores observados na região Centro-Sul [Macedo (2005a)]. Assim, relacionando os dados de produção de cana [Mapa (2007)] com o número de empregados no setor [Moraes (2007)], tem-se a produtividade por trabalhador indicada no Gráfico 35. É evidente, conforme esse gráfico, o significativo ganho de produtividade na agroindústria da Região Centro-Sul, com níveis acima de 500 toneladas de cana por trabalhador, ao passo que não se observa alteração nos valores para o Nordeste.

***Tabela 33* – Empregos diretos formais por atividade e região do setor sucroalcooleiro**

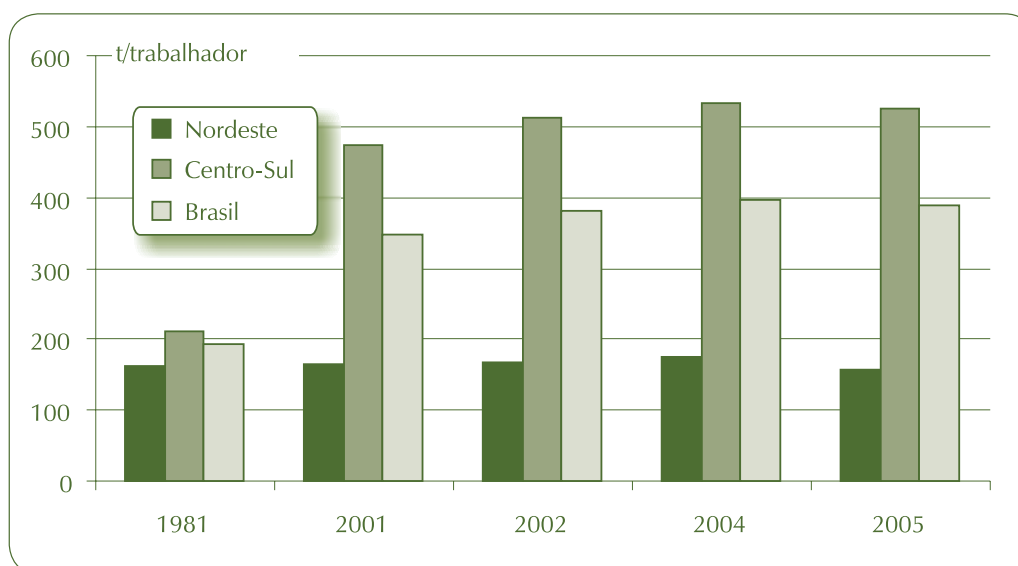
Atividade	Região	Ano			
		2000	2002	2004	2005
Produção de cana	Norte-Nordeste	81.191	86.329	104.820	100.494
	Centro-Sul	275.795	281.291	283.820	314.174
	Brasil	356.986	367.620	388.121	414.668
Produção de açúcar	Norte-Nordeste	143.303	174.934	211.864	232.120
	Centro-Sul	74.421	126.939	193.626	207.453
	Brasil	217.724	301.873	405.490	439.573
Produção de bioetanol	Norte-Nordeste	25.730	28.244	26.342	31.829
	Centro-Sul	42.408	66.856	80.815	96.534
	Brasil	68.138	95.100	107.157	128.363
Todas	Brasil	642.848	764.593	900.768	982.604

Fonte: Moraes (2005).

O plantio da cana, os tratos culturais e, principalmente, sua colheita representam as maiores demandas de pessoal temporário em uma usina de açúcar e bioetanol, correspondendo a cerca de 70% da mão-de-obra contratada, com níveis de emprego distintos para os períodos

de safra e entressafra. Para uma unidade agroindustrial moderna, que processa anualmente dois milhões de toneladas de cana, são necessários cerca de 2.500 funcionários, um valor que pode variar bastante, dependendo do grau tecnológico da usina e do nível de mecanização [Macedo (2005a)]. No estudo desenvolvido pelo Nipe/Unicamp, considerando agrupamentos de 15 usinas produtoras de bioetanol, com capacidade de moagem também de dois milhões de toneladas de cana cada uma, estimou-se uma geração total de 22 mil empregos [CGEE (2005)].

A relação entre os níveis de emprego na safra e na entressafra é denominada coeficiente de sazonalidade e permite verificar o quanto a demanda de pessoal é variável ao longo do ano. A sazonalidade dos empregos na agroindústria da cana vem se reduzindo como conseqüência da extensão das safras e da maior mecanização. Os valores, em São Paulo, passaram de 2,2, em 1980, para 1,8, no fim dos anos 1980, e alcançaram 1,3 em meados dos anos 1990 Macedo (2005a)]. Como referência, o coeficiente de sazonalidade do arroz é 7, o do feijão fica entre 3 e 4,5, o da laranja é 7,8, o da soja se situa entre 3,5 e 12 e o do algodão atinge 40, uma indicação de que o emprego nessas culturas ao longo do tempo é bem mais desigual do que no caso da cana [Leite (1990)].

***Gráfico 35* – Produtividade média dos trabalhadores da agroindústria canavieira no Brasil**

Fonte: Moraes (2005).

Além do número de postos de trabalho oferecidos, é igualmente importante sua qualidade. Nesse sentido, é interessante revisar o trabalho de Balsadi (2007) sobre a evolução da quali-

dade do emprego na agricultura brasileira entre 2001 e 2004, para as principais culturas e diferentes tipos de relações de trabalho. Com base em dados detalhados da PNAD, adotaram-se como variáveis o nível educacional dos empregados, o grau de formalidade do emprego, o rendimento recebido no trabalho principal e os auxílios recebidos pelos empregados, para definir índices quantitativos e estabelecer uma avaliação objetiva da qualidade dos empregos. Suas conclusões indicam melhorias importantes em diversos indicadores socioeconômicos para os trabalhadores na lavoura da cana-de-açúcar no Brasil nos últimos anos:

- aumento do nível de formalidade no emprego, com um elevado percentual de trabalhadores com carteira assinada (possibilita o acesso à aposentadoria e outros direitos, como pagamento por horas extras e assistência médica), o que torna a cultura da cana-de-açúcar uma das atividades com maior nível de formalidade no emprego no meio rural;

- ganhos reais de salários entre 1992 e 2005, de 34,5% para os empregados permanentes com residência urbana, de 17,6% para os permanentes rurais, de 47,6% para os temporários urbanos e de 37,2% para os temporários rurais; e

- aumento e diversificação dos benefícios recebidos pelos trabalhadores, tais como auxílios para transporte e alimentação, além de auxílio-moradia para os residentes rurais e de auxílio-saúde para os empregados permanentes com residência urbana.

Nesse estudo, ainda se apontam como fatos positivos a expressiva redução do trabalho infantil (participação de apenas 0,8% em 2004, em comparação com 1993, em Pernambuco, quando 25% dos cortadores de cana tinham entre 7 e 17 anos de idade) e o aumento da escolaridade dos empregados. Outros pesquisadores têm exposto conclusões similares, reforçando o papel da organização dos trabalhadores, das convenções coletivas de trabalho e da legislação trabalhista como componentes relevantes na consecução desses avanços, especialmente na Região Centro-Sul, onde o nível médio de escolaridade dos trabalhadores na produção de cana e na indústria de bioetanol, em 2005, era superior a cinco e a nove anos, respectivamente. Para as mesmas condições, o salário médio, em 2005, era US$ 280,00 e US$ 509,00, respectivamente, para a produção de cana e de bioetanol [Moraes (2007)].

Apesar das melhorias alcançadas, ainda existem situações adversas, principalmente para os empregados temporários ocupados na colheita manual da cana-de-açúcar, em que as condições de trabalho são bem mais árduas do que na indústria e em que se adota um sistema de pagamento por volume de cana cortado. Alguns questionam esse sistema, afirmando que causa situações de extremo desgaste dos cortadores de cana [Alves (2006)]. Não obstante, esse tema é controverso. O fim do pagamento por produção não é consensual entre os sindicatos e há uma parcela de trabalhadores a favor de sua manutenção. Como representante das usinas, a Unica tem se mostrado contrária ao fim dessa sistemática de remuneração, embora destaque que busca com as usinas garantir o efetivo cumprimento das normas vigentes,

visando ao pagamento correto dos cortadores, conforme estipulado nas convenções coletivas de trabalho [Moraes (2007)].

Nesse contexto de maior valorização do trabalhador, a agroindústria da cana atravessa uma transição importante, conseqüência dos ganhos de produtividade agroindustrial, associados a inovações mecânicas, físico-químicas e biológicas, que permitem ampliar a produção mantendo a demanda de insumos e recursos. Entre essas inovações, destaca-se a crescente mecanização na colheita, decorrente, por sua vez, da necessidade de eliminar progressivamente a queima da palhada durante os próximos anos e reduzir os custos da colheita, entre outros fatores. Estima-se que, na safra 2006/2007, a colheita mecanizada tenha sido empregada em 40% dos canaviais no Centro-Sul, em uma tendência crescente na qual mais de 400 colhedeiras são vendidas a cada ano, cada uma delas executando o trabalho de 80 a 100 cortadores de cana [CGEE (2007)]. Cedo ou tarde, esse modelo de produção de cana será replicado em outras regiões brasileiras, com evidente impacto sobre o nível de emprego. No período 2000–2005, frente a um incremento de 28,8% na produção de cana, a expansão do número de empregos foi de 18%. Estima-se que, a partir de 2020, praticamente não exista mais corte manual de cana em São Paulo e prevê-se também que, entre 2006 e 2020, o quadro de empregados da agroindústria canavieira nesse estado se reduza de 260 mil para 146 mil trabalhadores, mesmo com a geração de mais 20 mil empregos na indústria [Moraes (2007)].

Para enfrentar esses novos tempos, duas linhas de ação diretamente relacionadas aos trabalhadores podem ser empreendidas: em uma direção, proporcionando e apoiando atividades econômicas alternativas para os trabalhadores potencialmente desempregados, em seus locais de origem; e em outra, reforçando a preparação de recursos humanos para a agroindústria. Em ambos os casos, não consistem em tarefas triviais, mas que se impõe tratar como prioridade. A elevação dos requisitos de formação de pessoal pelas usinas brasileiras, em todas as suas áreas e nos diversos níveis de responsabilidade, já tem motivado um grande esforço para o atendimento dessa crescente demanda de mão-de-obra especializada, especialmente mediante cursos de nível médio e superior voltados especificamente para a produção de cana e bioetanol. Uma terceira possibilidade seria reduzir o ritmo da perda de postos de trabalho para os cortadores de cana, por exemplo, pela adoção de tecnologias intermediárias como a Unidade Móvel de Auxílio à Colheita (Unimac), que substitui apenas parcialmente a mão-de-obra, conferindo maior segurança e conforto aos trabalhadores no corte da cana crua e com recuperação da palha [Alves (2007)].

É oportuno observar que, mesmo com expressivas reduções na demanda de mão-de-obra, o bioetanol de cana-de-açúcar continuará sendo bastante intensivo em trabalho. Nas condições atuais, por unidade de energia produzida, a produção de bioetanol, comparada ao carvão mineral, à hidreletricidade e ao petróleo, necessita, respectivamente, de 38, 50 e 152 vezes mais trabalho humano [Goldemberg (2002)]. Como uma interessante variação do mesmo tema, Leal (2005) mostra que, enquanto cada veículo abastecido com derivados de petróleo requer um homem-ano de trabalho para atender ao seu consumo, a introdução de 24% de bioetanol como aditivo na gasolina eleva a demanda de pessoal para seis homens-ano e, caso

seja utilizado bioetanol hidratado puro, esse mesmo veículo vai precisar de 22 trabalhadores para produzir seu biocombustível.

A criação de oportunidades de trabalho e a perspectiva de sua distribuição entre trabalhadores do valor agregado na cadeia produtiva são duas das características mais importantes da bioenergia e, em particular, do bioetanol de cana-de-açúcar, constituindo um diferencial relevante entre essa tecnologia energética e suas congêneres. Mesmo com a adoção de tecnologias de alta produtividade e menor impacto sobre a demanda de mão-de-obra, tendência aparentemente inexorável, a produção de bioetanol permanece uma grande geradora de empregos, cada vez de maior qualidade, com correspondente elevação dos requisitos de capacitação e da remuneração média. Além disso, é importante reconhecer o papel relevante da atividade agroindustrial como geradora de renda e dinamizadora da atividade econômica local e regional, com benefícios indiretos significativos. De forma alguma devem-se considerar as atividades extenuantes e de baixa produtividade como inerentes à bioenergia. A progressiva redução da colheita manual da cana deve ser vista como um avanço desejável e na direção de maior sustentabilidade nessa agroindústria.

Etanol de cana-de-açúcar e a questão fundiária

Um aspecto correlato ao papel do bioetanol na geração de empregos e renda no meio rural tem a ver com a concentração fundiária associada à expansão de sua produção. De modo geral, esse tema se insere possivelmente em um dos maiores desafios para o desenvolvimento harmônico da economia brasileira: a compatibilização das demandas sociais pelo acesso à terra com a implementação de uma base produtiva eficiente e competitiva no meio rural. No caso da agroindústria sucroalcooleira, essa questão ganha maior densidade por conta das áreas ocupadas e pelo nível de verticalização existente, em que pese a existência de milhares de fornecedores de cana e arrendatários. Assim, a produção de cana e bioetanol apresenta uma significativa economia de escala, que se incrementa com a progressiva adoção das tecnologias de maior produtividade e a correspondente diluição dos custos fixos por maior volume de produto. Nessas condições, nas unidades de maior capacidade, observa-se uma efetiva redução dos custos, justificando o processo de paulatina concentração das propriedades, no âmbito da legislação agrária.

Agrava essa tendência a baixa atratividade de grande parte das atividades agropecuárias e o esvaziamento econômico de algumas regiões, onde a cultura canavieira passa a ser uma das poucas alternativas viáveis, se consideradas apenas as culturas tradicionais. Como nos demais aspectos comentados nos parágrafos anteriores, cumpre ao Estado um papel decisivo, para estimular tanto a produção bioenergética como a de outros bens agropecuários, preservando a eficiência econômica e os pequenos empreendedores rurais. Não parece aqui também existir um conflito inescapável, sobretudo frente à ampla disponibilidade de terras e às perspectivas dos mercados agrícolas, incluindo alternativas inovadoras de cultivo e criação que permitem maior agregação de valor por unidade de produto do que a produção bioenergética.

No entanto, para preservar a agricultura familiar e seu padrão de produção agrícola, tem sido sugerido fomentar a produção de biocombustíveis de forma descentralizada e sob escalas que permitam a inserção do pequeno agricultor como um produtor de biocombustível, associada à implantação de práticas agroecológicas e à eventual redução de deslocamentos entre as áreas produtoras e os centros consumidores. Essas possibilidades ainda estão por demonstrar sua viabilidade, já que pressupõem modelos produtivos bastante diferentes dos praticados na atualidade. Por causa da reduzida experiência com as micro e minidestilarias de bioetanol, para produção de mil e cinco mil litros diários (valores típicos), respectivamente, ainda não é possível assegurar que constituam uma alternativa a ser promovida, requerendo uma visão inovadora da tecnologia de produção do bioetanol de cana-de-açúcar. Nesse sentido, um ponto importante é a necessidade de articular a produção de bioetanol com outras atividades agropecuárias, de modo a compensar a baixa produtividade, característica inerente a essas unidades, com sistemas de extração, fermentação e destilação necessariamente simplificados, apresentando produtividade de 40 litros de bioetanol por tonelada de cana processada, cerca da metade do valor observado em usinas de maior porte [Horta Nogueira (2006b)]. Uma possibilidade a ser explorada para melhorar esse quadro seria a associação da produção de bioetanol com a pecuária bovina, que poderia valorizar o bagaço disponível durante a safra como volumoso na alimentação de gado de corte. De todo modo, na acepção de sistemas eficientes, a produção de bioetanol de cana-de-açúcar tem se mostrado mais adequada, até o momento, em escalas industriais e, possivelmente, as cooperativas de produtores associadas a usinas convencionais são uma alternativa mais consistente do que as pequenas unidades produtoras.

Ainda sobre concentração econômica e suas implicações, é necessário observar que a agroindústria do bioetanol, como praticada no Brasil, poderia ser considerada relativamente concentradora, ao ser comparada com algumas outras atividades agropecuárias, embora, ao ser cotejada com atividades de cunho energético, como também se classifica, configure-se como uma indústria altamente descentralizada, com milhares de fornecedores e com os grupos industriais mais importantes não alcançando controlar 10% da capacidade total de produção. Assim, a descentralização é uma característica inescapável da bioenergia, que necessita de amplos espaços para captar a energia solar.

Efeitos induzidos em outros setores da economia

A ampla articulação da agroindústria do bioetanol com outros setores econômicos, a montante e a jusante da produção e do processamento da cana-de-açúcar, distribui os benefícios gerados nesse setor de um modo bastante interessante. Um levantamento nesse sentido, utilizando um modelo estendido de matrizes insumo-produto, mostra como toda a economia nacional tende a se expandir com o crescimento da produção de bioetanol [CGEE (2005)]. Além dos setores produtores de cana-de-açúcar e etanol e computando efeitos indiretos e induzidos, deverão ser mais afetados os setores de produtos químicos diversos (que inclui fertilizantes), refino de petróleo, comércio, logística e aluguéis de imóveis.

Utilizando uma matriz ajustada para 2002 e considerando os resultados obtidos como indicativos, estimou-se nesse estudo que, para colocar em produção uma unidade com um milhão de metros cúbicos de bioetanol de capacidade anual, seriam agregados R$ 119 milhões por ano devidos aos investimentos. Durante a operação, devem ser gerados ainda cerca de R$ 1,46 bilhão, anualmente, computando-se os efeitos diretos, indiretos e induzidos [CGEE (2005)]. Em uma extensão desse estudo, para as condições observadas no Centro-Sul brasileiro, estimou-se que o processamento de um milhão de toneladas de cana visando à produção de bioetanol corresponde a um incremento de R$ 171 milhões na produção econômica e à geração de 5.683 empregos, considerando analogamente os efeitos diretos, indiretos e induzidos, desagregados como mostrado na Tabela 34.

***Tabela 34* – Impactos diretos, indiretos e induzidos do processamento de um milhão de toneladas de cana-de-açúcar para a produção de álcool**

Setor	Valor da produção (R$ milhão)	Valor adicionado (R$ milhão)	Empregos
Cana-de-açúcar	44,5	20,8	1.467
Resto da agropecuária	14,3	8,1	697
Açúcar	8,0	2,7	31
Álcool	97,8	38,9	211
Eletricidade	6,8	7,3	37
Extrativa mineral	0,3	0,2	4
Siderurgia, mineração e metalurgia	7,1	2,1	48
Máquinas, veículos e peças	9,3	4,2	51
Petróleo e gás	29,5	12,1	12
Setor químico	13,9	4,7	41
Alimentos	15,4	3,1	93
Construção civil	1,3	0,8	23
Resto da transformação	16,8	5,7	287
Comércio e serviços	81,3	53,0	2.679
Famílias	–	7,3	–
Total	346,3	171,0	5.683

Fonte: Scaramucci e Cunha (2008).

7.5 Certificação e sustentabilidade na agroindústria do bioetanol

Como uma das formas de garantir a sustentabilidade em relação ao bioetanol e ao biodiesel, têm sido propostos, principalmente por países industrializados, sistemas de certificação capazes de

assegurar que os biocombustíveis sejam produzidos e distribuídos de modo sustentável, podendo, conseqüentemente, ser utilizados com propósitos ambientais.

O estabelecimento de critérios e padrões de sustentabilidade amplamente aceitos enfrenta como dificuldade básica a inerente complexidade dos sistemas bioenergéticos, com sua gama de matérias-primas, tecnologias e contextos de produção. Cabe notar ainda que os sistemas de certificação para biocombustíveis, em bases voluntárias ou mandatórias, não dispõem ainda de um arcabouço legal internacional para sua sustentação, embora esses sistemas possam vir a ser utilizados no âmbito dos compromissos de mitigação da mudança climática, proteção à biodiversidade e tratados comerciais.

A certificação é, tipicamente, uma exigência colocada pelos consumidores aos produtores. Desse modo, a concepção de sistemas de certificação impõe um tratamento objetivo e cuidadoso dos aspectos de sustentabilidade, e sua implementação implica, necessariamente, a existência de agentes monitoradores independentes, que assegurem o equilíbrio e a isenção imprescindíveis. É importante que os sistemas de certificação sejam desenhados adequadamente, para evitar o risco de que sirvam como barreiras comerciais adicionais e atuem como medidas protecionistas, restringindo o espaço das alternativas sustentáveis e privilegiando as bioenergias ineficientes. Outra preocupação, pelo lado dos produtores, é o custo dos sistemas de certificação, que pode inviabilizar a produção em pequena escala.

A seguir, apresentam-se os principais esforços em curso para avaliar e eventualmente certificar a sustentabilidade de biocombustíveis (GBEP, 2007):

- Em janeiro de 2007, a Comissão Européia estabeleceu como meta (não-mandatória) introduzir até 2020 um teor de 10% de biocombustíveis (etanol e biodiesel) nos combustíveis utilizados para transporte em cada país membro, devendo ser adotado um sistema de avaliação da sustentabilidade, atualmente em desenvolvimento.

- Associado ao requerimento de um teor de 5% de combustível de origem renovável em todo combustível automotivo vendido no Reino Unido em 2010, conforme definido na Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO), os produtores de biocombustível deverão reportar o balanço de gases de efeito estufa e o impacto ambiental de seus produtos (The House of Commons, 2008).

- Na Holanda, teve início em 2006 o desenvolvimento de critérios de sustentabilidade para bioenergia, com atividades em curso para testar tais critérios em projetos-piloto e definir sistemas de monitoramento e certificação. Um extenso exercício sobre os possíveis indicadores apresenta um juízo favorável ao bioetanol produzido no Brasil, em particular no Estado de São Paulo [Smeets et al. (2006)].

- Na Alemanha, foi revisada, recentemente, a legislação de fomento aos biocombustíveis, incluindo exigências obrigatórias de atendimento a critérios de sustenta-

bilidade, com base na matéria-prima, proteção do *habitat* natural e redução das emissões de gases de efeito estufa.

– No âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep), encontra-se em discussão a definição de critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis, com sugestões de que sejam adotadas metas concretas e instrumentos para sua implementação. Nesse sentido, o Unep vem trabalhando em estreita colaboração com instituições governamentais, entidades privadas e representantes da sociedade civil, incluindo o Global Bioenergy Partnership e a Roundtable on Sustainable Biofuels, comentados adiante [Unep (2008)].

– A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO) está desenvolvendo o projeto "Segurança Alimentar e Bioenergia" (Bioenergy and Food Security), com o propósito de estabelecer um arcabouço analítico para a avaliação dos impactos sobre o suprimento alimentar determinados pela expansão da produção de bioenergia, considerando os sistemas baseados em produtos alimentares e os denominados sistemas bioenergéticos de segunda geração [BFS/FAO (2008)].

– A FAO e a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial, (Unido) estão preparando um projeto para o Fundo Global para o Meio Ambiente (Global Environment Facility – GEF), visando orientar os países sobre as condições ambientais e socioeconômicas para produção, conversão e uso sustentáveis de biocombustíveis.

– A Mesa Redonda sobre Biocombustíveis Sustentáveis (Roundtable on Sustainable Biofuels – RSB), liderada pelo Centro de Energia da Escola Politécnica Federal de Lausanne, na Suíça, é uma iniciativa internacional envolvendo agricultores, empresas, organizações não-governamentais, especialistas, agências internacionais e de governo interessados em garantir a sustentabilidade da produção e da conversão dos biocombustíveis. Nesse sentido, vem promovendo uma série de reuniões, teleconferências e debates buscando construir um consenso em torno dos princípios e critérios na produção de biocombustíveis sustentáveis. Os princípios considerados para a avaliação da sustentabilidade na produção dos biocombustíveis estão disponíveis para análise [Frie et al. (2006) e EPFL (2008)].

– O grupo de trabalho internacional IEA Task 40, no âmbito do Acordo de Bioenergia da Agência Internacional da Energia, desenvolve atividades focadas no comércio internacional de biomassa e bioenergia, suas implicações e perspectivas, trabalhando especificamente no desenvolvimento de sistemas de certificação, padronização e terminologia para a promoção do comércio internacional de vetores bioenergéticos em bases sustentáveis, provendo análise e informações importantes sobre os esforços em curso nesse campo [IEA Bioenergy (2008)].

– Os governos do Brasil, dos Estados Unidos e da União Européia, principais produtores mundiais de biocombustíveis e membros do Fórum Internacional dos Biocombustíveis (International Biofuels Forum – IBF), divulgaram em fevereiro de 2008 o *Livro branco sobre especificações de biocombustíveis internacionalmente compatíveis*, com uma análise das atuais especificações, conduzida por um grupo internacional de especialistas com o objetivo de facilitar a expansão do comércio desses produtos. Os esforços iniciais são para desenvolver procedimentos, sistemas e materiais de referência para testes de qualidade em bioetanol e biodiesel, até mesmo para permitir, mediante métodos analíticos, determinar se um combustível provém de fontes renováveis [NIST (2008)].

O setor privado na área de combustíveis, especialmente na Europa, considera a sustentabilidade um fator importante no desenvolvimento da bioenergia, e algumas empresas estão desenvolvendo procedimentos próprios que assegurem a aquisição de produtos sustentáveis. No entanto, a maior parte das empresas interessadas em adquirir e vender biocombustíveis sustentáveis está procurando se envolver nos processos com participação mais plural, vistos como mais legítimos pelos consumidores. Como exemplo, a BP, a DuPont, a Petrobras e outras grandes empresas participam da Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB). No âmbito de outros produtos de origem agrícola, também têm sido implementados sistemas análogos de certificação dos aspectos de sustentabilidade, como para madeira, soja e óleo de palma.

Como uma última iniciativa a mencionar, voltada para assegurar padrões de sustentabilidade na produção de bioetanol, o Protocolo Agro-Ambiental, assinado em 2006 pelo governo do Estado de São Paulo e a Unica, implementou o Programa Bioetanol Verde, para fomentar as boas práticas do setor sucroalcooleiro por meio de um certificado de conformidade e determinar um padrão positivo a ser seguido pelos produtores. Em fase de operacionalização e aplicação em larga escala em todo o estado, o instrumento cobre alguns dos principais pontos de redução de impactos da cultura, como a antecipação dos prazos de eliminação da queima da palha da cana, a proteção de nascentes e dos remanescentes florestais, o controle das erosões e o adequado gerenciamento das embalagens de agrotóxicos [Lucon (2008)].

Sistemas de certificação da sustentabilidade com esse perfil, se adequadamente desenhados e bem implementados, poderão servir como instrumentos para que a produção dos biocombustíveis se desenvolva em um marco desejável de racionalidade, como tem sido demonstrado que o bioetanol de cana-de-açúcar pode atender, competitivamente.

Capítulo 8

Perspectivas para um mercado mundial de biocombustíveis

Diversos países têm mostrado interesse no desenvolvimento da produção e no uso de bioetanol. Além de procurar cobrir suas próprias necessidades energéticas, em muitos casos busca-se constituir um mercado mundial para esse biocombustível, que aproxime países em condições de produzi-lo sustentavelmente do mercado de países potencialmente importadores, com vantagens para ambos. Na atualidade, tal mercado ainda é incipiente, mas as demandas crescentes por um combustível renovável e ambientalmente adequado, associadas ao potencial que o bioetanol de cana-de-açúcar apresenta para atender a critérios objetivos de sustentabilidade, sinalizam a existência de perspectivas interessantes. O presente capítulo apresenta os condicionantes para que o bioetanol seja um produto global, tomando por base sua demanda e oferta presentes e futuras, bem como as políticas e tendências relacionadas à sua produção e à sua comercialização.

Embora essa discussão seja usualmente centrada no bioetanol, será analisado aqui o contexto geral dos biocombustíveis, incluindo alguma informação sobre o biodiesel. Inicialmente, apresenta-se uma estimativa do potencial para a produção bioenergética, seguida de uma revisão dos dados atuais e prospectivos para a oferta e a demanda de bioetanol e do quadro de políticas e estratégias voltadas para a produção e o uso de biocombustíveis, temas fundamentais para que os mencionados potenciais e as expectativas de mercados se desenvolvam. Neste capítulo, analisam-se ainda as inter-relações entre a segurança alimentar e a produção de biocombustíveis e são comentados os fatores de indução para um mercado global do bioetanol, relacionados com os desafios ambientais e o reforço do comércio internacional de produtos agrícolas.

8.1 Potencial global para produção de biocombustíveis

Diversos estudos têm sido conduzidos para lançar luz sobre um dos principais temas que regem o futuro dos biocombustíveis e do bioetanol em particular. Em que quantidade e onde poderiam ser disponibilizados? Não é uma pergunta simples de responder, já que o potencial de oferta dos biocombustíveis não é um número absoluto e estático, como uma reserva mineral, mas uma estimativa dinâmica, que depende de cenários geográficos, econômicos e políticos que se alteram, assim como de tecnologias de produção e conversão, muitas delas ainda em desenvolvimento. Por exemplo, caso se viabilizem as propostas de produção de biodiesel de algas marinhas, como estimar seu potencial de produção?

Além disso, a base de recursos naturais dedicada aos cultivos energéticos, como terras e água, é necessariamente limitada e também deve ser compartilhada com a produção de alimentos para pessoas e animais, insumos industriais (fibras têxteis, madeira para celulose e outros fins etc.), proteção à natureza, entre uma variedade de outros usos. Em particular, amplia a complexidade dessa temática sua relação próxima com a oferta de alimentos, o que torna relevante conhecer o potencial sustentável da produção, da conversão e do uso de biocombustíveis frente às preocupações com a segurança alimentar.

Desse modo, estabelecer os limites e as fronteiras para a produção de biocombustíveis e, sobretudo, considerar critérios de sustentabilidade são tarefas complexas. Para enfrentá-las, como veremos mais adiante neste capítulo, têm sido desenvolvidos modelos analíticos e computacionais capazes de modelar e simular os impactos dessa relação, destinados a avaliar políticas e dar suporte aos tomadores de decisão na formatação de programas bioenergéticos. Uma visão da ampla rede de relações a ser considerada entre as demandas agrícolas e florestais e as bioenergias, conforme modelagem sugerida pela FAO, é apresentada na Figura 30.

Estudos preliminares sobre a disponibilidade de biomassa [Berndes et al. (2003)] concluíram que a possível contribuição da biomassa para o futuro da oferta global de energia poderá variar de cerca de 100 EJ/ano a 400 EJ/ano em 2050, o que significa 21% a 85% do atual consumo total de energia no planeta, estimado em 470 EJ. As interações entre o setor bioenergético em expansão e outros usos da terra, como para a produção de alimentos, proteção à biodiversidade, conservação do solo e da natureza e seqüestro de carbono, foram avaliadas recentemente em alguns estudos.

Em um dos trabalhos mais conhecidos, utiliza-se uma abordagem *bottom-up* para processar informações sobre uso da terra, sistemas de produção agrícola, projeções de demanda de alimentos e informações sobre possíveis avanços em gestão agrícola (tanto para cultivos como para produção de carne e laticínios) [Smeets et al. (2006)]. Considerando o uso da biomassa para energia em três categorias – plantações energéticas em terras cultiváveis, produção de biomassa em terras marginais e resíduos de agricultura e silvicultura, esterco e outros resíduos orgânicos [Junginger et al. (2007)] – e com base na abordagem descrita na Figura 30, estima-se que, globalmente, essas categorias podem suprir 200 EJ, 100 EJ e 100 EJ, respectivamente, o que corresponderia ao limite superior apontado anteriormente, de 400 EJ.

***Figura 30* – Visão geral dos principais elementos usados na metodologia de avaliação do potencial bioenergético**

1. Demanda de alimentos

Estimativa do consumo *per capita* (três cenários: baixo, médio e alto; três tipos de alimentos: produtos vegetais, animais e marinhos/aquáticos)

Estimativa de crescimento populacional (três cenários: baixo, médio e alto)

Estimativa de demanda de produtos animais

Estimativa de demanda de cultivos alimentares

Estimativa de demanda de produtos aquáticos

4. Demanda de madeira e lenha

Estimativa de demanda de madeira industrial

Estimativa de demanda de madeira combustível

Comparação entre a demanda e a oferta de madeira industrial e madeira combustível e cálculo da oferta excedente disponível para bioenergia

2. Demanda de rações animais e uso da terra

Estimativa da fração produzida de rações, em três sistemas: confinado, misto e pastagens

Estimativa da eficiência da conversão de rações animais em três níveis de avanço tecnológico: baixo, médio e alto

Estimativa da composição das rações animais por nível tecnológico, sendo incluídos três tipos de rações: cultivos; forragens e pastagens permanentes; e reaproveitamento de resíduos e carcaças

3. Demanda de cultivos e uso da terra

Estimativa de produtividade e áreas disponíveis para produção de cultivos alimentares (seis tecnologias agrícolas)

Alocação de terras para cultivos

Cálculo das áreas excedentes nas pastagens, disponíveis para cultivos alimentares e de rações

Análise das alternativas de suprimento de rações por meio de diferentes fontes de produção

Demanda de cultivos para rações

Demanda de forragens e pastagens permanentes

Demanda de rações de resíduos e carcaças

Sem uso da terra

Comparação com o uso atual da terra para agricultura e estimativa do excedente de terras

Estimativa da produtividade dos cultivos bioenergéticos (para um nível de tecnologia agrícola)

Estimativa do potencial de produção de bioenergia nas terras excedentes da agricultura

6. Fornecimento de resíduos e rejeitos

Estimativa da produção e consumo de madeira e lenha

Estimativa da produção e disponibilidade de resíduos energéticos

Estimativa da disponibilidade de resíduo com potencial de uso como bioenergia

5. Fornecimento de madeira

Estimativa da área atualmente reflorestada, evolução e produtividade

Estimativa da produção madeireira não silvicultural

Estimativa do crescimento bruto anual

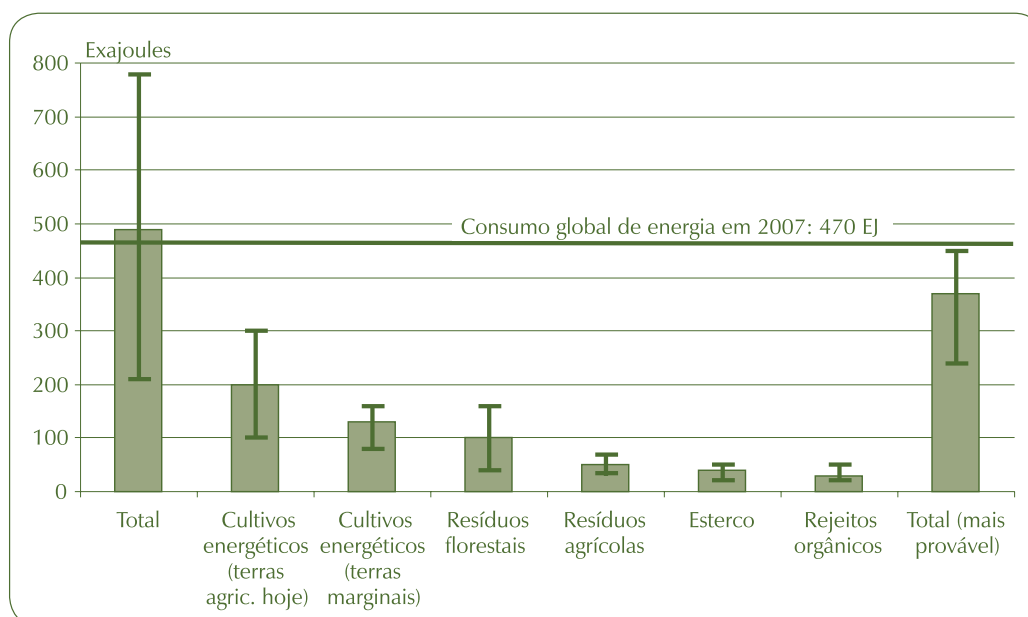
Estimativa das áreas florestais disponíveis para fornecimento de madeira, excluindo áreas protegidas (assumidas no mínimo em 10% de áreas florestais nacionais)

Fonte: Smeets et al. (2006).

Não é trivial determinar um valor que represente o potencial global de produção de biocombustíveis. Confirmando essa constatação, o Gráfico 36 apresenta as faixas de variação de oferta de biomassa para fins energéticos resultantes de diversas abordagens e métodos, apresentando para o potencial total global uma variação entre 205 EJ e 790 EJ [Juergens (2007)]. Nessa figura, apresenta-se também a demanda global de energia estimada para 2007. A principal razão para as variações observadas entre os limites superiores e inferiores é a elevada incerteza nos dois parâmetros mais críticos para as avaliações de potencial: disponibilidade de terras e níveis de produtividade. Além disso, as expectativas de oferta futura de biomassa proveniente de florestas e resíduos agrícolas e da silvicultura variam significativamente entre os estudos, como se detalha a seguir.

A Tabela 35 exibe uma avaliação do potencial técnico dos biocombustíveis, com base em quatro sistemas de produção agrícola hipotéticos, considerando, essencialmente, cultivos energéticos e resíduos agrícolas e silviculturais. Não foram considerados nesse levantamento

o sebo e outros subprodutos gordurosos com potencial bioenergético. Como uma restrição importante, em todos os cenários não se permite que ocorra escassez de alimentos. Com relação à demanda alimentar, os modelos desses estudos usaram como referência básica os dados nacionais publicados no Balanço Alimentar da FAOSTAT (Food Balance Sheets – FBS) [FAO (2003)].

Gráfico 36 **– Potencial bioenergético por tipo de biomassa**

Fonte: Juergens (2007).

Na Tabela 35, os cenários considerados para os sistemas produtivos de 1 a 3 têm em comum o fato de serem baseados em hipóteses de crescimento médio da população humana global entre 1998 e 2050 (de 5,9 bilhões para 8,8 bilhões de pessoas) e uma evolução do consumo *per capita* de alimentos médio (de 2,8 Mcal a 3,2 Mcal por pessoa ao dia), com perspectivas de estabelecimento de vastas plantações (de 123 milhões a 284 milhões de ha) e alto nível tecnológico para a produção de cultivos energéticos. Assumindo os mesmos cenários de demanda, o cenário 4 incorpora a hipótese de que os esforços em pesquisa e desenvolvimento poderiam aumentar as safras para além do patamar tecnológico utilizado no cenário 3, resultando safras 25% maiores em razão dos avanços tecnológicos. O sistema de produção agrícola é que determina os requerimentos de área para cultivo de alimentos, incluindo os requerimentos para alimentação animal e, conseqüentemente, o volume de resíduos de colheita a ser gerado. Assim, o cenário 3 se baseia em um sistema de criação de animais sem a utilização de pastagens, no qual toda a alimentação animal provém de cultivos

e resíduos agrícolas. Os cenários 1 e 2 baseiam-se em um sistema de produção mista, no qual uma grande parte da alimentação animal provém de pastagens. A produção de resíduos de colheitas a partir de cultivos de alimentos humanos e para animais é, conseqüentemente, o ponto alto no sistema 3. As pequenas diferenças entre a produção de resíduos nos sistema 1 e 2 são causadas pelas diferenças na alocação de produção dos cultivos. O sistema de produção também determina o nível de avanço da tecnologia agrícola e influencia a fração gerada de resíduos de colheitas.

***Tabela 35* – Potencial total técnico de produção de bioenergia para diversas regiões e cenários produtivos em 2050**
(EJ por ano)

Região	Cenário produtivo			
	1	2	3	4
América Latina e Caribe	89	162	234	281
América do Norte	39	75	168	204
África Subsaariana	49	117	282	347
Norte da África e Oriente Médio	2	2	31	39
Europa Ocidental	13	19	25	30
Europa do Leste	5	13	24	29
Comunidade de Estados Independentes (CEI) e países bálticos	83	111	223	269
Índia e Sul Asiático	23	26	31	37
Ásia Oriental	22	28	158	194
Japão	2	2	2	2
Oceania	40	55	93	114
Total	367	610	1.273	1.548

Fonte: Smeets et al. (2006).

Esse estudo permitiu constatar que o maior potencial para a produção de cultivos energéticos encontra-se na África Subsaariana e na região da América Latina e Caribe, que alcançam, no cenário produtivo 4, produções anuais de 317 EJ e 281 EJ, respectivamente. As duas regiões possuem áreas agrícolas não utilizadas e ecologicamente adequadas para a produção de cultivos energéticos, em particular a cana-de-açúcar. A Ásia Oriental também tem um potencial considerável para a produção de cultivos, de 147 EJ anuais no cenário produtivo 4. Entre os países industrializados, a região da Comunidade dos Estados Independentes e das nações bálticas, a América do Norte e a Oceania apresentam os potenciais mais significativos. Regiões áridas, com terras de menor produtividade ou limitações de área, como Japão, Sul Asiático e Norte da África e Oriente Médio, têm potencial zero ou muito reduzido. O impacto da tecnologia adotada para a produção animal sobre as disponibilidades de área agrícola para o desenvolvimento dos biocombustíveis é bastante relevante para a América Latina, como evidenciado nos cenários produtivos avaliados, já que produtos como carne, leite e ovos são muito mais intensivos em relação ao uso da terra por unidade de produto do que a produção agrícola [FAO (2003)].

Os resultados desse estudo são bastante otimistas no que diz respeito ao impacto da produção bioenergética sobre a produção de alimentos. Uma conclusão importante é que, sem afetar a produção alimentar até 2050, nos cenários produtivos 1 a 4, o potencial global total de bioenergia produzida anualmente, estimado para esse ano, corresponde, respectivamente, a 78%, 129%, 270% e 329% da demanda energética observada em 2005. A maior parte desse potencial é gerada por cultivos energéticos especializados, desenvolvidos em terras agricultáveis excedentes, que não seriam mais necessárias para produção de alimentos. Reitere-se que a disponibilidade de terras agricultáveis excedentes entre os vários sistemas depende principalmente da eficiência com que os alimentos de origem animal são produzidos. Nesses potenciais, os resíduos, inclusive o lixo urbano, são responsáveis por 76 EJ a 96 EJ por ano. Os autores citam outras estimativas publicadas na literatura científica [Hoogwijk et al. (2003) e Wolf et al. (2003)], que confirmam os resultados alcançados.

Um pré-requisito para atingir os níveis de produção de cultivos energéticos estimados nos parágrafos anteriores é a introdução de sistemas avançados de produção agrícola, com maior utilização de insumos, como fertilizantes e agroquímicos, e sobretudo a otimização das safras. Note-se que, como resultado desses avanços, entre 15% e 72% da área agrícola em uso poderia ser disponibilizada para a produção de cultivos energéticos nos sistemas 1 e 4, respectivamente.

A Tabela 36 mostra o potencial global de produção de bioenergia, indicando as condições gerais para alcançar tais níveis de produção. Nessa tabela, para cada contexto produtivo, são fornecidas duas faixas de variação para o potencial bioenergético: a) sob hipóteses pessimistas, com limitado acesso a terras de cultivo; e b) sob pressupostos otimistas, considerando uma alta demanda de bioenergia. Um limite inferior igual a zero significa que o potencial disponível pode ser nulo, caso não se consiga modernizar a agricultura, impondo maior demanda de terras para alimentar a humanidade.

Para o caso particular dos biomateriais, o potencial bioenergético associado poderia até mesmo ser negativo, pois uma alta demanda de biomassa para a fabricação de produtos como bioplásticos ou materiais de construção pode reduzir a disponibilidade de biomassa para produção de energia. Entretanto, quanto mais forem utilizados biomateriais, mais subprodutos e lixo orgânico serão disponibilizados ao final do ciclo de vida desses produtos, que podem ser utilizados para a produção de energia. Tal utilização de biomassa resultará em benefício "duplo" em relação aos gases de efeito estufa, evitando emissões na fabricação de materiais com uso de combustíveis fósseis e por meio da produção de energia. A oferta anual de energia provinda de biomateriais que terminam como lixo pode variar entre 0 EJ e 50 EJ. Essa faixa de variação exclui o efeito cascata (usos sucessivos) e não leva em conta o retardo de tempo entre produção do material e sua utilização final como combustível [Faaij e Domac (2006)].

Tabela 36 – **Potencial de diversas matérias-primas e sistemas produtivos para bioenergia**

Contexto de produção de bioenergia	Principais hipóteses e observações	Oferta potencial bioenergética até 2050 (EJ/ano)	
		Pessimista	Otimista
Produção de energia em terras agricultáveis hoje	Área requerida – pessimista: 0 Gha a 4 Gha; otimista: 1 Gha a 2 Gha. Uma produção bioenergética elevada exige a adaptação estrutural dos sistemas de produção agrícola. Foi assumida uma produtividade anual de 8 t a 12 t de biomassa seca/ha, com expectativas de maior produtividade em solos mais férteis.	0 a 700	100 a 300
Produção de biomassa em terras marginais	Em escala global, a área máxima a ser utilizada seria de 1,7 Gha, com baixa produtividade, 2 t a 5 t de biomassa seca/ha.ano (38 GJ/ha.ano a 95 GJ/ha.ano). A oferta pode ser limitada pelo fraco desempenho econômico ou pela competição com produção de alimentos .	0 a 150	60 a 150
Biomateriais	Área de cultivo necessária para atender à demanda global de biomateriais: 0,2 Gha a 0,8 Gha (produtividade média: 5 t de biomassa seca/ha.ano). Se as terras marginais e a silvicultura forem capazes de atender a essa demanda, a demanda de terras agricultáveis será nula.	0 a 150	40 a 150
Resíduos agrícolas	Estimativas tomadas de vários estudos. O potencial depende de índices de produção e do tipo de sistema de produção: os sistemas intensivos permitem maior utilização de resíduos do que os extensivos.	15 a 70	
Resíduos florestais	O potencial bioenergético sustentável das florestas do mundo é pouco conhecido. O valor superior é atribuído ao potencial técnico, que inclui os resíduos de processamento.	0 a 150	30 a 150
Esterco	Utilização de esterco seco. Estimativa inferior baseada na utilização atual e estimativa superior baseada no potencial técnico. A utilização no longo prazo é incerta.	0 a 55	5 a 55
Lixo orgânico	Estimativa baseada em dados da literatura. Depende fortemente do desenvolvimento econômico, do consumo e do uso de biomateriais. Os números incluem a fração orgânica do lixo urbano e restos de madeira. Valores maiores são possíveis com o uso mais intensivo de biomateriais.	5 a 50	
Total	No cenário mais pessimista, não há disponibilidade de terras para a produção de energia, apenas resíduos são considerados. No cenário mais otimista, a agricultura intensiva utiliza solos de alta qualidade.	40 a 1.100	250 a 500

Fonte: Faaij e Domac (2006).

Em relação ao uso da terra e seu impacto na disponibilidade de terras para agricultura, um relatório da Agência Internacional de Energia [IEA Bioenergy (2007)] aponta como realista a expectativa de que a atual contribuição da bioenergia de 40 EJ a 55 EJ por ano aumentará consideravelmente, sendo esperado ainda neste século um aporte anual entre 200 EJ e 400 EJ. Com base em dados geralmente aceitos, esse relatório observa que um terço dessa energia poderia ser suprido por resíduos e lixo, um quarto pela regeneração de terras degradadas ou marginais e o restante por terras agricultáveis e pastagens atuais. Disso, conclui-se que quase um bilhão de hectares no mundo podem ser utilizados na produção de biomassa para fins energéticos, incluindo 400 milhões de hectares de terras aráveis e pastagens e uma área maior de terras marginais e degradadas, o que significa em torno de 7% da superfície terrestre e menos de 20% da terra atualmente em uso para produção agrícola.

Outros relatórios [Best et al. (2008)] apontam que, dos 13,2 bilhões de hectares da área total de terras globais, 1,5 bilhão de hectares são usados para fins agrícolas e 3,5 bilhões de hectares são usados para pecuária de corte, laticínios e produção de lã. Os cultivos usados atualmente para o fim específico de produção de biocombustíveis, como resultado da escolha de agricultores, utilizam apenas 0,025 bilhão de hectares. No Brasil, por exemplo, mais da metade da demanda total de gasolina é suprida pelo etanol produzido em 1% dos 320 milhões de hectares de terras aráveis e pastagens, nenhuma delas na floresta amazônica.

É interessante observar que, além da produção de biocombustíveis, os cultivos utilizados na produção de energia também fornecem subprodutos como forragem animal, fertilizantes e bioeletricidade, em volumes significativos. Nesse sentido, nos capítulos anteriores apresentou-se a diversidade de co-produtos da cana-de-açúcar, simultâneos ao bioetanol, nas condições atuais e prospectivas.

Para concluir, pode-se afirmar que, embora as metodologias e ferramentas para a avaliação detalhada do potencial global para produção sustentável de biocombustíveis estejam ainda em desenvolvimento e como os dados sobre disponibilidade de biomassa para fins energéticos não estão disponíveis em muitos países, existe, em escala global, um grande e inexplorado potencial bioenergético, com relevantes conclusões preliminares: a) o potencial de oferta da bioenergia depende fortemente dos padrões de produção de alimentos, em particular do comprometimento de áreas com a criação de animais; b) algumas regiões demonstram clara vantagem comparativa; e c) o potencial total disponível é, sob pressupostos otimistas, da mesma magnitude da demanda energética global. O tópico a seguir procura apresentar como esse potencial vem sendo explorado.

8.2 Oferta e demanda de biocombustíveis: quadro atual

Efetivamente, os biocombustíveis podem ter um papel essencial no atendimento da demanda global de energia. A maioria dos países possui algum nível de recursos potenciais de bioe-

nergia, o que a torna uma das mais difundidas alternativas de oferta energética na atualidade, correspondendo à única fonte renovável de energia que, seja como biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, pode ser usada para atender a uma ampla gama de aplicações: produção de eletricidade, fornecimento de calor em indústrias e residências e abastecimento de veículos automotores. A seguir, apresentam-se dados para a atual contribuição dos biocombustíveis à matriz energética mundial, considerando os principais mercados, e as condições particulares de oferta para o bioetanol.

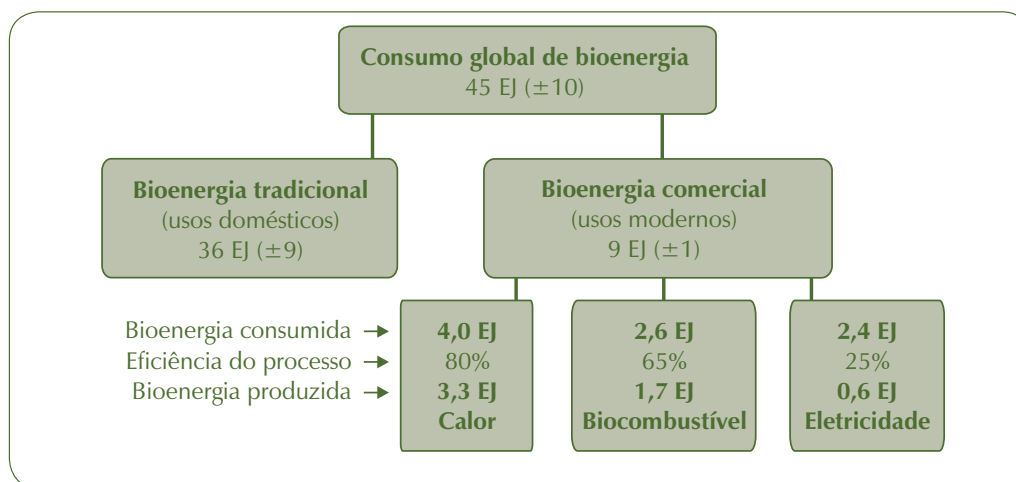
Em escala global, a Figura 31 mostra a contribuição da biomassa à oferta primária e secundária (após as conversões em outras formas energéticas) em 2007. Como fonte de calor, destacam-se a lenha e o bagaço de cana; entre os biocombustíveis líquidos, incluem-se o bioetanol e o biodiesel; e para geração de eletricidade, são utilizados a lenha (inclusive como lixívia celulósica nas fábricas de papel e celulose) e o bagaço de cana, considerando também os sistemas de co-geração, em que o calor rejeitado nos sistemas termelétricos é usado em algum processo térmico, com sensível economia energética.

***Figura 31* – Contribuição de bioenergia à oferta primária e secundária de energia em 2007**

Consumo global de bioenergia
45 EJ (±10)

Bioenergia tradicional
(usos domésticos)
36 EJ (±9)

Bioenergia comercial
(usos modernos)
9 EJ (±1)

Bioenergia consumida →	**4,0 EJ**	**2,6 EJ**	**2,4 EJ**
Eficiência do processo →	80%	65%	25%
Bioenergia produzida →	**3,3 EJ**	**1,7 EJ**	**0,6 EJ**
	Calor	**Biocombustível**	**Eletricidade**

Fonte: Best et al. (2008).

Os biocombustíveis líquidos, especialmente o etanol produzido da cana-de-açúcar e de excedentes de milho e outros cereais e, em escala bem menor, o biodiesel produzido de grãos e palmáceas representam, modestamente, 1,7 EJ (em torno de 1,5%) do uso de combustíveis para transporte no mundo. O interesse global nesses biocombustíveis, que podem ser utilizados como fonte energética para transporte, é crescente na Europa, no Brasil, na América do Norte e na Ásia (notadamente, Japão, China e Índia) [IEA (2004)]. A produção global de eta-

nol mais do que duplicou desde 2000, enquanto a produção de biodiesel, partindo de uma base bem menor, se expandiu quase três vezes nesse período. Por outro lado, a produção de petróleo cresceu apenas 7% desde 2000 e, possivelmente, deverá atingir seu ápice de produção em alguns anos, segundo diversos analistas. Realmente, frente a esse quadro de relativa estagnação na produção petroleira, os biocombustíveis mostraram uma expansão vigorosa: em 2007, a produção de etanol e de biodiesel ficou 43% acima da produção observada em 2005. Nesses níveis, a produção de etanol em 2007 representou em torno de 4% dos 1.300 bilhões de litros de gasolina consumidos anualmente em todo o mundo [REN21 (2008)].

É interessante notar que, em 2006, os biocombustíveis líquidos foram responsáveis por pouco mais de 1% da energia mundial renovável e pouco menos de 1% da oferta anual de petróleo bruto, avaliada em 4.800 bilhões de litros (aproximadamente 83 milhões de barris por dia). Esse cenário está mudando muito rapidamente na maioria dos grandes países consumidores de energia, que estão adotando políticas visando uma utilização muito maior de biocombustíveis na próxima década [ESMAP (2005)]. Com base no local de produção e na matéria-prima utilizada, os biocombustíveis líquidos relevantes na atualidade podem ser classificados, *grosso modo*, em poucos tipos: bioetanol de cana-de-açúcar (no Brasil), bioetanol de milho (nos EUA) e biodiesel de colza (na Alemanha), e em segundo plano, bioetanol de beterraba e trigo na Europa. A produção de biocombustíveis ainda está concentrada em poucos países: nos últimos anos, o Brasil e os Estados Unidos produziram 90% de etanol, enquanto a Alemanha foi responsável por 50% da produção global de biodiesel [Martinot (2008)].

Um estudo realizado pela Parceria Global de Bioenergia [GBEP (2007)] avaliou as tendências para biocombustíveis no grupo dos países G8+5, que envolve alguns dos mais ativos no cenário bioenergético, seja como produtores ou usuários, exportadores ou importadores. Além dos países do G8 (Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão, Rússia, Reino Unido e Estados Unidos), foram incluídos mais cinco ("países +5"): África do Sul, Brasil, China, Índia e México. Com base nesse estudo, a Tabela 37 apresenta a contribuição da bioenergia na oferta total primária de energia (*total primary energy supply* – TPES), basicamente equivalente à produção energética nacional somada às importações e excluindo-se as exportações. A China, com 9.000 PJ por ano, é o maior usuário de bioenergia, seguido pela Índia, com 6.000 PJ, Estados Unidos, com 2.300 PJ, e Brasil, com 2.000 PJ de demanda anual, enquanto no Canadá, na França e na Alemanha a contribuição da bioenergia é de cerca de 450 PJ anuais. A evolução, ao longo dos últimos anos, indica que a demanda de biocombustíveis tende a aumentar em um ritmo bastante elevado no Brasil, na Alemanha, na Itália e no Reino Unido, enquanto na França, no Japão, na Índia e no México tende a se manter estável.

Do ponto de vista de sua importância em relação às demais fontes energéticas, a Tabela 38 mostra como evoluiu nos últimos anos a fração da demanda total de energia coberta por biocombustíveis nos países do G8+5, que pode ser considerada representativa para outros países da Europa, da Ásia e da América Latina. Na maioria dos países africanos, bem como nos países mais pobres de outras regiões, os dados são bem diferentes, já que a demanda de

madeira como combustível e outras formas tradicionais de biocombustíveis, como resíduos, cobre de forma quase absoluta os dados de consumo bioenergético.

Tabela 37 **– Biocombustíveis na oferta total primária de energia (Em PJ)**

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Canadá	409	408	418	437	480	481	451	487	489	510	525
França	440	467	438	453	439	430	437	406	420	419	422
Alemanha	139	143	195	210	207	229	246	271	312	348	441
Itália	52	51	59	63	69	74	79	76	81	121	123
Japão	191	193	199	183	190	196	180	187	191	190	198
Rússia	259	221	190	157	208	163	158	151	149	143	146
Reino Unido	52	54	57	55	56	61	64	70	82	96	115
Estados Unidos	2.554	2.607	2.531	2.601	2.507	2.551	2.285	2.256	2.474	2.633	2.697
Países do G8	**4.097**	**4.144**	**4.086**	**4.160**	**4.156**	**4.186**	**3.900**	**3.904**	**4.198**	**4.460**	**4.666**
Brasil	1.728	1.706	1.719	1.756	1.838	1.794	1.823	1.951	2.110	2.277	2.801
China	8.610	8.656	8.703	8.750	8.906	8.973	9.053	9.127	9.202	9.277	9.360
Índia	5.862	5.918	5.978	6.039	6.144	6.230	6.313	6.389	6.464	6.539	6.620
México	328	329	338	343	337	333	337	333	336	337	348
África do Sul	479	487	495	504	516	529	539	545	551	547	564
Países +5	**17.006**	**17.095**	**17.233**	**17.392**	**17.741**	**17.859**	**18.064**	**18.345**	**18.662**	**18.977**	**19.693**
Países G8+5	**21.103**	**21.239**	**21.319**	**21.552**	**21.897**	**22.045**	**21.964**	**22.249**	**22.860**	**23.437**	**24.359**

Fonte: GBEP (2007).

A contribuição dos biocombustíveis à demanda total de energia alcança quase 30% no Brasil e na Índia e apenas 1% no Reino Unido e na Rússia. Em países como Canadá, França, Alemanha e Estados Unidos, essa contribuição varia entre 3% e 4%, alcançando cerca de 20% na Suécia e na Finlândia. A parcela atendida pela bioenergia na Índia, na China e no México está diminuindo, muito provavelmente por causa do aumento no uso de querosene e GLP nas residências. Por outro lado, a contribuição dos biocombustíveis nos países do G8, especialmente na Alemanha, na Itália e no Reino Unido, cresceu a uma taxa anual de 4% a 6% nos últimos anos.

Dados sobre produção de bioetanol revelam importantes tendências de expansão e diversificação. Em 2006, a produção total mundial desse biocombustível foi de 51,3 bilhões de litros e no ano seguinte alcançou 55,7 bilhões de litros. Em 2007, com uma produção de 26 bilhões de litros com base no milho, os Estados Unidos continuaram na liderança da produção global de bioetanol e o Brasil, segundo produtor mundial, produziu nesse mesmo ano cerca de 20 bilhões de litros de bioetanol derivado da cana-de-açúcar [REN21 (2008)]. Como líderes da produção de bioetanol na Ásia, a China e a Índia produziram 3,7 bilhões e 2,3 bilhões de litros em 2007, respectivamente. Também em 2007, a produção de todos os

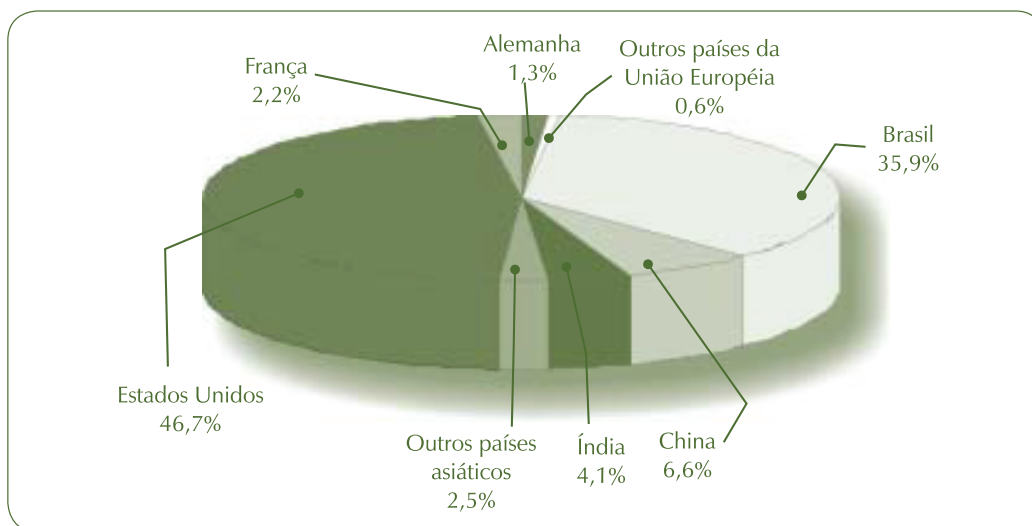
países asiáticos alcançou 7,4 bilhões de litros. Na União Européia, a produção de bioetanol subiu de 1,6 bilhão de litros, em 2006, para cerca de 2,3 bilhões de litros, em 2007. Como maior produtor europeu de bioetanol, a França produziu em 2007 em torno de 1,2 bilhão de litros, seguida da Alemanha, com 850 milhões litros [F. O. Licht (2007)]. O Gráfico 37 sintetiza a participação dos principais produtores de bioetanol na oferta total, na qual os países em desenvolvimento correspondem a cerca da metade da produção observada.

Tabela 38 **– Participação relativa dos biocombustíveis na oferta total primária de energia**
(Em %)

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Canadá	4,2	4,1	4,2	4,4	4,6	4,6	4,4	4,7	4,5	4,5	4,6
França	4,4	4,4	4,2	4,2	4,1	4,0	3,9	3,6	3,7	3,6	3,6
Alemanha	1,0	1,0	1,3	1,4	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,4	3,1
Itália	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,6	1,6
Japão	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
Rússia	1,0	0,8	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
Reino Unido	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2
Estados Unidos	2,9	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,4	2,4	2,6	2,7	2,8
Países do G8	**2,2**	**2,2**	**2,2**	**2,2**	**2,2**	**2,1**	**2,0**	**2,0**	**2,1**	**2,2**	**2,3**
Brasil	26,6	25	23,9	23,7	24,1	23,1	23,3	24,3	26	26,5	29,8
China	19,6	19	19,1	19,2	19,4	19,4	19,6	18,2	16,2	14,0	13,0
Índia	36,1	35,3	34,3	33,9	32,5	32,4	32,3	31,9	31,5	30,0	29,4
México	5,9	5,7	5,7	5,5	5,4	5,3	5,3	5,1	5,0	4,9	4,7
África do Sul	10,9	11	11,1	11,1	11,3	11,4	11,8	12,4	11,1	10,2	10,7
Países +5	**22,2**	**21,6**	**21,4**	**21,3**	**21,3**	**21,2**	**21,4**	**20,6**	**19,2**	**17,4**	**16,9**

Fonte: GBEP (2007).

É notável como esse quadro tem evoluído de forma acelerada, com taxas elevadas de crescimento a cada ano. De fato, os valores da produção de bioetanol apresentados nesse tópico representam uma pequena fração do potencial de produção existente, que deverá ser mais bem desenvolvido nos próximos anos, como se analisa no tópico seguinte.

Gráfico 37 – **Distribuição da produção de etanol em 2007 por regiões**

Fonte: Elaborado com base em REN21 (2008) e F. O. Licht (2007).

8.3 Projeções para oferta e demanda de bioetanol em 2010–2015

A presente seção focaliza a oferta e a demanda de bioetanol no começo da próxima década, quando se espera que o mercado desse biocombustível tenha começado a se desenvolver. Analisa-se separadamente a situação da América do Norte (excluindo México, tratado no âmbito da América Latina), da União Européia, da América Latina e Caribe e da Ásia e Oceania, considerando especialmente os países que já implementaram ou estarão implementando políticas de incentivos à produção e ao consumo de biocombustíveis. Em sua maior parte, os valores foram tomados de estudos desenvolvidos pelo Global Biofuels Center, instituição dedicada a estudos estratégicos nos mercados de biocombustíveis. Para o Brasil, serão apresentadas projeções na seção dedicada à América Latina, com base na evolução prevista para o mercado de combustíveis e na capacidade instalada em unidades de processamento de cana-de-açúcar. Para o continente africano, onde se observam algumas iniciativas para fomentar o uso dos biocombustíveis, foram efetuadas projeções de mercado de forma mais agregada. Ao final, é apresentado um quadro geral, com a situação de cada mercado no horizonte previsto.

América do Norte, exclusive México

Tanto o Canadá como os Estados Unidos estão desenvolvendo normas nacionais para combustíveis renováveis que tornarão obrigatória a adição de uma percentagem de biocombustíveis à gasolina e ao diesel. Nos Estados Unidos, a atual referência para as políticas públicas federais para biocombustíveis é o Programa de Normas para Combustíveis Renováveis (Renewable Fuels Standard – RFS). A Lei de Políticas Energéticas, editada em 2005, estabeleceu as diretrizes desse programa, que foi desenvolvido e regulamentado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency – EPA) e passou a vigorar em 1º de setembro de 2007. Esse programa determinava que uma certa porcentagem de gasolina vendida ou usada por motoristas fosse de combustível renovável, determinação cumprida sem dificuldades, pois os Estados Unidos já consumiam em 2007 mais combustíveis renováveis do que exigia a RFS [White House (2008)].

Entretanto, a partir do fim de 2007, com a edição do Ato de Segurança e Independência Energética (Energy Independence and Safety Act – EISA), foram revisadas as metas do RFS, aumentando a quantidade exigida de biocombustível de modo a atingir progressivamente uma demanda de 136 bilhões de litros de bioetanol e outros biocombustíveis até 2022 [USDA (2008)]. Essa legislação define novas categorias de combustíveis renováveis, estabelecendo níveis mínimos de consumo crescentes ao longo do tempo para as categorias de menor impacto ambiental:

> Biocombustível convencional: definido como bioetanol derivado de amido de milho. As novas unidades de produção de etanol que começaram a ser construídas após a regulamentação dessa lei devem atingir uma redução de emissões de gases do efeito estufa de 20% em seu ciclo de vida, comparadas às emissões de referência. O índice obrigatório de redução das emissões de gases do efeito estufa durante o ciclo de vida pode ser reduzido a 10% se a EPA determinar que a exigência é impraticável.
>
> Biocombustível avançado: combustível renovável, que não o bioetanol de amido de milho, derivado de biomassa renovável, e que atinge uma redução das emissões de gases do efeito estufa durante o ciclo de vida da ordem de 50% abaixo do valor de referência. Essa definição, de acordo com a legislação norte-americana, inclui biocombustíveis diversos, como bioetanol de celulose, bioetanol de açúcar ou de amido que não sejam de milho; ou biocombustíveis produzidos de rejeitos animais, alimentares, agrícolas e domésticos, diesel de biomassa, biogás (incluindo gás de aterros sanitários e esgotos), butanol e outros álcoois produzidos de biomassa e outros combustíveis derivados de biomassa celulósica.
>
> Biocombustível celulósico: combustível renovável produzido com base em qualquer celulose, hemicelulose ou lignina, derivado de biomassa renovável e que atinge uma redução das emissões de gases do efeito estufa durante o ciclo de vida da ordem de 60% abaixo do valor de referência.

As novas disposições, conforme determinado pelo EISA, estabelecem que os combustíveis renováveis atendam aos limites mínimos de redução de emissão dos gases do efeito estufa durante seu ciclo de vida, incluindo as emissões durante todos os estágios de produção da matéria-prima e do combustível e de distribuição, contabilizando emissões diretas e indiretas, que incluem as emissões que resultam de mudanças no uso da terra. De acordo com as projeções do Global Biofuels Center, acredita-se que as novas metas estabelecidas na legislação norte-americana serão provavelmente alcançadas, com uma produção interna de bioetanol de 70 milhões de metros cúbicos em 2015 [Global Biofuels Center (2008)].

De forma semelhante, o governo do Canadá deverá tornar obrigatória a adição de 5% em volume de combustível renovável na gasolina, a partir de 2010, estando em desenvolvimento a regulamentação para implementar as normas correspondentes. De acordo com essa proposta, para atender à mistura obrigatória, haverá uma demanda de 2,2 bilhões de litros de bioetanol em 2010 e espera-se que a oferta seja de 2,9 bilhões de litros, com expectativas de que novas instalações de produção de etanol sejam construídas e entrem em operação até 2015. De fato, supondo que seja implementado em 2015 uma mistura com 10% de bioetanol, serão necessários mais de 4,7 bilhões de litros, bastante acima da capacidade de produção atualmente instalada.

União Européia

Na União Européia, que conta atualmente com 27 estados-membros, alguns países passaram a se interessar por biocombustíveis ainda na década de 1990, mas foi a partir do fim de 2001 que surgiram ações mais coordenadas em nível comunitário, ao mesmo tempo em que a agroindústria bioenergética passou a crescer, apoiada pela adoção de políticas favoráveis e incentivos fiscais em diferentes países. Os dois países onde os biocombustíveis (com destaque para o biodiesel) alcançaram a maior penetração no mercado de combustíveis automotivos foram a Alemanha e a Suécia. Países com grandes áreas de terras aráveis e políticas protecionistas em relação a suas agroindústrias, como a França, também implementaram ferramentas específicas para promover a utilização de biocombustíveis. É interessante constatar que, a partir de 2006, pela primeira vez os investimentos europeus em bioetanol, associados ao cumprimento das metas estabelecidas para 2010, superaram os investimentos em biodiesel.

Outros estados-membros, como a Espanha, promoveram a produção de biocombustíveis sem possuir grandes mercados domésticos, com a intenção de exportar os excedentes de sua produção. Os Países Baixos e o Reino Unido adotaram posturas mais conservadoras e consideram os biocombustíveis de segunda geração uma alternativa mais sustentável do que a atual primeira geração. Esses dois países, entretanto, estabeleceram sistemas de obrigatoriedade para a utilização de biocombustíveis. O caso da República Tcheca, que se tornou estado-membro em 2004, é também de interesse, pelo rápido desenvolvimento de biocombustíveis que tem ocorrido desde 2006, quando o preço do petróleo alcançou patamares elevados.

Com o objetivo de criar mercados mais robustos de biocombustíveis, a Comissão Européia propôs uma meta mínima obrigatória de 10% de energia produzida com base em biocombustíveis até 2020. O ordenamento utilizado para tanto são as diretivas, que vinculam o estado-membro quanto a resultados a alcançar, embora deixem às instâncias nacionais a competência quanto à forma e aos meios. Desse modo, tem efeito direto, mas sem aplicabilidade direta [Soares (1997)]. As duas principais diretivas sobre o uso de biocombustíveis na União Européia são a Diretiva para Biocombustíveis (Biofuels Directive), lançada em 2003, que estabelece as metas de uso para biocombustíveis, e a Diretiva para a Qualidade dos Combustíveis (Fuel Quality Directive), revisada em 2007, que considera a redução das emissões de gases de efeito estufa e inclui os biocombustíveis nas especificações de qualidade dos combustíveis europeus.

As metas estabelecidas pela Diretiva para Biocombustíveis são indicativas (não-vinculadoras), estabelecidas como percentagens em energia sobre o uso de combustíveis fósseis no setor de transporte. Para 2005, a meta foi de 2% e, para 2010, é de 5,75%, sempre referidos ao conteúdo energético. Em janeiro de 2008, a Comissão Européia publicou sua proposta de Diretiva para Energia Renovável, que deverá prevalecer sobre a Diretiva para Biocombustíveis a partir de 2010. Essa recente diretiva proposta inclui a obrigatoriedade do uso de 10% de biocombustíveis por conteúdo energético até 2020, meta que deverá ser alcançada com o uso de biocombustíveis sustentáveis, definidos em relação a parâmetros estabelecidos na própria diretiva, e com o uso de biocombustíveis de segunda geração, que será contabilizado em dobro no atendimento da meta proposta para 2020. A Diretiva para Energia Renovável proposta está sendo discutida no Parlamento Europeu e no Conselho de Ministros, com expectativas de que seja aprovada até junho de 2009.

De acordo com a Associação Européia de Produtores de Bioetanol (eBIO), a produção de etanol em 2007 cresceu 13,5%, uma taxa modesta se comparada aos 70% observados em 2006 e 2005. Essa associação informa ainda que as importações de etanol bateram recorde em 2007, ficando próximas a um bilhão de litros. A Tabela 39 mostra a evolução dos indicadores da agroindústria e do mercado do bioetanol na União Européia de 2005 a 2007.

Com base nas hipóteses adotadas para o cenário moderado do projeto Refuel, desenvolvido com o patrocínio da União Européia em um esforço conjunto de diferentes instituições para promover o uso de biocombustíveis, o bioetanol deverá alcançar a meta de 5% de conteúdo energético em 2010, 7,5% em 2015 e 10% em 2020 [Refuel (2008)]. Não obstante, o aumento previsto para a produção, estimado em função das unidades produtoras de bioetanol existentes e anunciadas, demonstra que será necessária a importação de etanol, caso todas as fábricas trabalhem com 70% da capacidade em 2010 e 80% da capacidade em 2015 e 2020 [Global Biofuels Center (2008)].

Tabela 39 **– Capacidade, produção e consumo de bioetanol na União Européia (Em milhões de litros/ano)**

Ano	2005	2006	2007
Capacidade instalada	–	2.876	3.344
Produção	913	1.593	1.770
Consumo	1.150	1.700	2.700
Importação	237	107	930

Fonte: Global Biofuels Center (2008).

Com base na meta de 10% de etanol para 2020, serão necessários 17,7 bilhões de litros de etanol. A capacidade de produção local poderá alcançar 12,16 bilhões de litros em 2015 e, em seguida, permanecer constante, pois nenhum novo projeto para produção de bioetanol convencional foi iniciado, com a expectativa de que o etanol celulósico comece a entrar no mercado [Global Biofuels Center (2008)]. Em resumo, com metas obrigatórias e vários países implementando metas individuais de consumo para o etanol e o biodiesel, o crescimento da demanda poderá ser significativo na União Européia, acima da disponibilidade interna, e as importações deverão compensar a diferença entre oferta e demanda nessa região.

América Latina e Caribe, inclusive Brasil

A produção e a utilização de biocombustíveis têm grande potencial tanto na América Latina como no Caribe. A maioria dos países depende muito da importação de produtos de petróleo, além da demanda crescente de combustível de transporte e da grande disponibilidade de matéria-prima adequada para produzir etanol e biodiesel. Esses países têm em comum o desejo de ampliar sua segurança energética e promover o desenvolvimento econômico e social associado aos biocombustíveis, na forma como observado no Brasil, e consideram o desenvolvimento de programas de biocombustíveis um caminho para alcançar ambos os objetivos. Com esse propósito, muitos países da América Latina estão atualmente se movendo para introduzir misturas de bioetanol geralmente de 5% a 10% em volume na gasolina e, no caso do biodiesel, de 2% a 5% em volume no diesel. Entre as várias iniciativas em curso, dois países podem ser destacados por seus avanços: Colômbia e Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

Desde 2001, por meio da promulgação da Lei 693, teve início a implantação da produção e o uso do etanol na Colômbia. A exposição dos motivos dessa lei apresenta como seus objetivos principais a redução das emissões de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono, a manutenção e a geração de empregos agrícolas, o desenvolvimento agroindustrial e a contribuição ao propósito estratégico de auto-suficiência energética. Em resumo, essa lei estabelece já em seu primeiro artigo que "as gasolinas que são utilizadas nos centros urbanos de mais de 500 mil habitantes, no prazo final em setembro de 2006, terão que conter compostos tais como o álcool carburante". Nessa mesma lei, define-se a gasolina oxigenada com conteúdo de 10% de

biocombustíveis [UPME (2006)]. Esse programa foi precedido de cuidadoso planejamento e informação aos envolvidos e está em pleno andamento.

A primeira planta colombiana de bioetanol combustível começou a operar em 2005, com uma produção de 300 mil litros por dia. Em 2006, outras cinco usinas passaram também a produzir esse biocombustível, todas no Vale do rio Cauca, com uma capacidade combinada de 357 milhões de litros por ano. Nessa região, a cultura da cana-de-açúcar desenvolve-se muito bem, com a colheita ocorrendo durante todo o ano, o que confere às destilarias uma elevada disponibilidade. O governo colombiano espera que o país alcance até 2010 uma capacidade anual de produção de 1,7 milhão de litros de bioetanol, volume necessário para adicionar 10% de etanol à gasolina e obter excedentes exportáveis da ordem de 50% do total produzido [Horta Nogueira (2007)].

Na Costa Rica, as primeiras experiências com o bioetanol carburante desenvolveram-se durante a década de 1980, sem continuidade por causa dos baixos preços do petróleo a partir de 1985. Entretanto, com o cenário recente mais favorável aos biocombustíveis, o governo desse país articulou um novo programa para implantar o uso de bioetanol. Em maio de 2003, o Executivo costa-riquenho emitiu o Decreto 31.087-MAG-MINAE, criando uma Comissão Técnica para "formular, identificar e para projetar estratégias para o desenvolvimento do etanol anidro, destilado nacionalmente e usar matérias-primas locais, como substituto do MTBE da gasolina". Os objetivos básicos apresentados para esse decreto foram: o desenvolvimento agroindustrial (reativação econômica, geração do valor agregado), melhoria ambiental (por exemplo, mediante a substituição do MTBE) e, do ponto de vista energético, a diversificação das fontes e a redução da dependência externa do combustível. O programa visa adicionar inicialmente 7,5% de etanol na gasolina usada no país, desenvolvendo-se em sucessivas etapas, para a assimilação dos procedimentos operacionais e a expansão gradual da infraestrutura. Foram conduzidos ensaios em diferentes veículos com a mescla de combustível, com bons resultados, e sucessivamente passou-se à comercialização em mercados limitados. Considerando a adição de 10% de bioetanol em toda a gasolina usada no país, a demanda costa-riquenha desse biocombustível é estimada em 110 milhões de litros anuais em 2010. A empresa estatal de petróleo, Recope, tem desempenhado um papel fundamental para a adequada introdução do bioetanol na Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

Para evidenciar o potencial dos países latino-americanos para promover uma mistura de 10% de bioetanol de cana-de-açúcar na gasolina consumida internamente, em especial quanto à disponibilidade de terras e a dimensão da indústria açucareira local, foram explorados dois contextos [Cepal (2007)]: a) produção de bioetanol por meio da conversão do mel esgotado, assumindo uma produtividade de 78 litros de bioetanol por tonelada de açúcar produzido; e b) a produção exclusiva de bioetanol, considerando conservadoramente uma produtividade agrícola de 75 toneladas por hectare e uma produtividade industrial de 80 litros de bioetanol por tonelada de cana, correspondendo a 6 mil litros de bioetanol por hectare. Para o primeiro caso, determinou-se a fração da demanda de bioetanol que poderia ser atendida apenas com aquele subproduto da fabricação de açúcar, e, para o segundo caso, determinou-se a

área de cana requerida, como percentagem da área agrícola total e da área cultivada com cana-de-açúcar, informadas com base em Faostat (2008a). Os dados da demanda de gasolina e, portanto, a demanda de bioetanol referem-se a valores para 2004 [Olade (2006)]. Os resultados constam dos Gráficos 38 e 39, nos quais foram incluídos apenas os países com mais de mil hectares cultivados com cana-de-açúcar. Como o Brasil já tem um amplo programa de produção e uso do bioetanol, incluindo bioetanol puro, não faria sentido utilizar esses indicadores, por isso o país foi excluído dessa análise. Adiante, são apresentadas as projeções de mercado e produção específicas para o contexto brasileiro.

Como se observa nos Gráficos 38 e 39, o bioetanol de cana-de-açúcar pode ser produzido no âmbito das necessidades nacionais, sem impactos significativos. Na média, para a região latino-americana, com a meta de uma mistura de 10% de bioetanol na gasolina, a exigência de biocombustível poderia ser atendida em 35% por meio do uso dos melaços existentes ou, alternativamente, aumentado em 22% a atual superfície cultivada de cana, que significa cerca de 0,4% da superfície agrícola na produção, mas com marcante diversidade entre os países. Assim, Cuba, Guatemala, Guiana e Nicarágua apresentam elevada disponibilidade potencial de produção do bioetanol, com base no melaço, superior à necessidade correspondente a uma mistura de 10% na gasolina. Em outro extremo, no Haiti, no Suriname, no Uruguai e na Venezuela, a dimensão da agroindústria canavieira não alcança nem 10% das necessidades do etanol, pelo esquema considerado. Do ponto de vista das disponibilidades da terra, a situação pode ser considerada quase sem restrições na região latino-americana. Com exceção de Barbados, Jamaica, Trinidad e Tobago, Suriname e Venezuela, com menos de 1% da superfície agrícola dos países seria possível produzir o etanol suficiente para a mistura com 10%.

Outro fator importante que tem estimulado a produção do bioetanol nos países da América Latina e no Caribe é a reestruturação do regime açucareiro pela União Européia no âmbito da Política Agrícola Comum, que reduzirá as garantias de preço para esses países em 36% em quatro anos. Em resposta, países como Barbados, Belize, Jamaica e Guiana estão considerando direcionar suas disponibilidades de açúcar para a produção de etanol. A esse respeito, a Jamaica é o país mais adiantado, pois pretende implementar em 2008 a mistura mandatória de 10% de bioetanol na gasolina.

Além de suprir seus mercados internos, muitas vezes com dimensões limitadas, os países latino-americanos têm avaliado a possibilidade de exportar bioetanol, especialmente para os Estados Unidos. Alguns acordos dão um suporte favorecido a essas iniciativas, como o Acordo de Livre Comércio da América Central e República Dominicana (Dominican Republic – Central American Free Trade Agreement, DR-Cafta), ratificado pelo Congresso americano em 2005, e a Iniciativa da Bacia do Caribe (Caribbean Basin Initiative – CBI), estabelecida pelo Congresso americano em 1983 e que isenta, dentro de condições determinadas, os produtos importados dos países beneficiários (Antígua e Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbados, Belize, Ilhas Virgens Britânicas, Costa Rica, Dominica, República Dominicana, El Salvador, Granada,

Guatemala, Guiana, Haiti, Honduras, Jamaica, Montserrat, Antilhas Holandesas, Nicarágua, Panamá, São Cristóvão e Névis, Santa Lucia, São Vicente e Granadinas e Trinidad e Tobago).

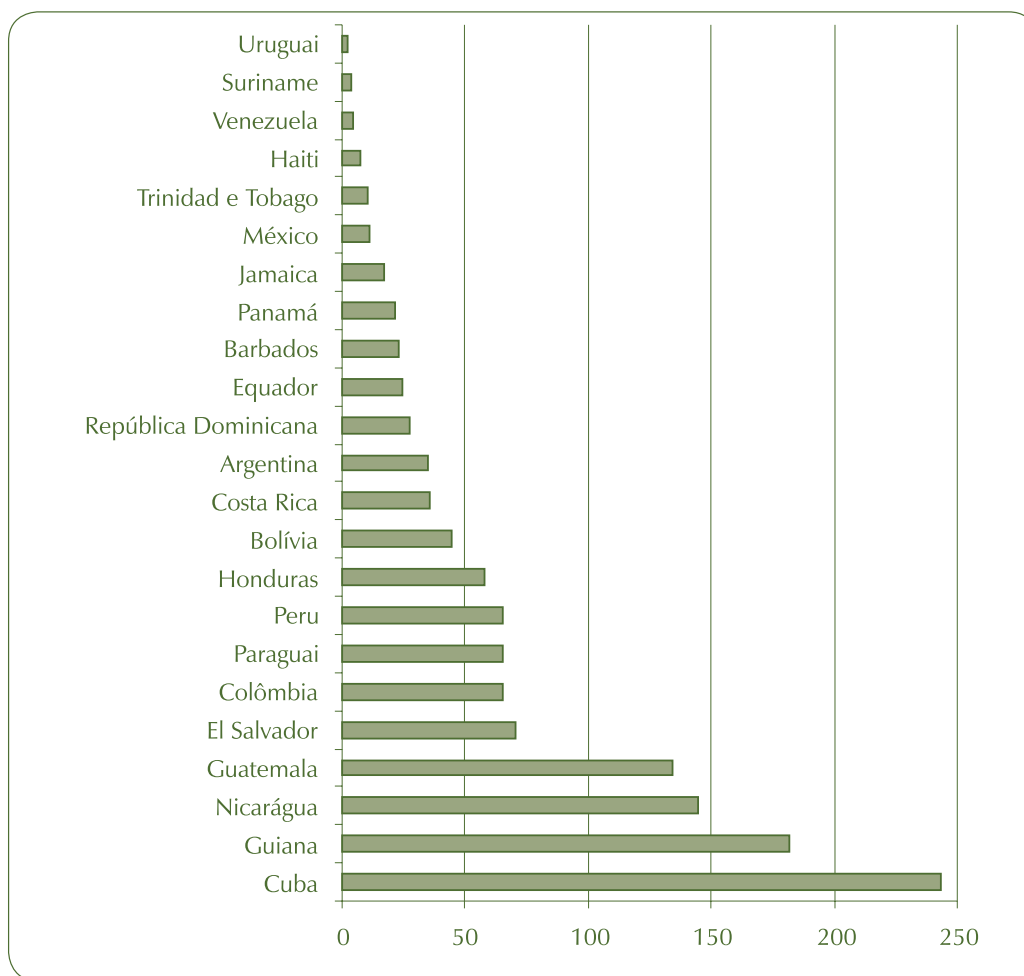
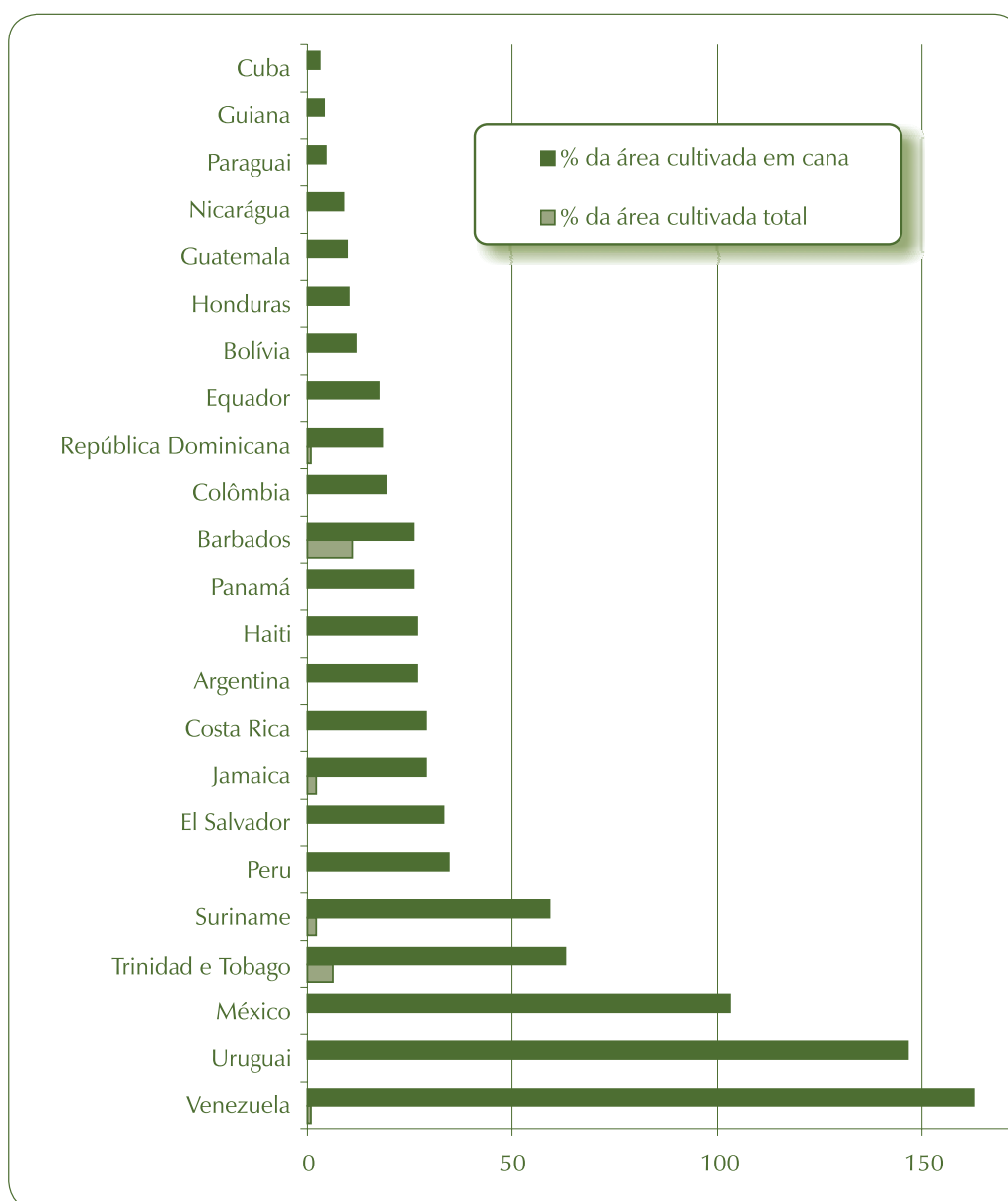
***Gráfico 38* – Fração da demanda de bioetanol para agregar 10% à gasolina passível de ser produzida mediante a conversão de mel residual disponível na fabricação de açúcar**
(Em %)

Fonte: Cepal (2007).

Gráfico 39 – Fração das áreas cultivadas (total e em cana) necessária para produzir bioetanol requerido para agregar 10% à gasolina, assumindo a conversão de caldo direto

Fonte: Cepal (2007).

No contexto do CBI, na maioria dos casos, o etanol hidratado é embarcado do Brasil para os países qualificados, onde é desidratado e exportado para os Estados Unidos. Os principais exportadores nesse esquema são Jamaica, Costa Rica, El Salvador e, mais recentemente, Trinidad e Tobago. Pelas regras da CBI, pode ser exportado bioetanol nos seguintes casos: a) volumes até 7% do mercado americano sem restrições de origem, ou seja, aceita-se biocombustível apenas processado no país, b) 132 milhões de litros de bioetanol como quota suplementar, que contenha pelo menos 35% de produto local; e c) um volume ilimitado de biocombustível desde que contenha mais de 50% de conteúdo local. As importações de bioetanol pelo mercado norte-americano se situaram em 4,6 bilhões de litros em 2006 e 2007, em sua maior parte (cerca de 75%) realizadas através do CBI e, em menor grau, oriundas diretamente do Brasil, do Canadá e de outros países [Global Biofuels Center (2008)].

Para a região latino-americana, excluindo o Brasil, foi elaborada uma projeção da oferta e da demanda de bioetanol, a ser apresentada adiante junto aos valores para as demais regiões. Foram levados em conta os seguintes países que estão ou estarão implementando programas de biocombustível até 2010: Argentina, Colômbia, Costa Rica, República Dominicana, Equador, Jamaica, México, Paraguai, Peru, Trinidad e Tobago, Uruguai e Venezuela. Considerou-se que a oferta até 2010 incluiria a produção de unidades atualmente em operação e em construção e projetadas para entrar em operação até esse ano. Supõe-se também que, até 2015, a maior parte das unidades atualmente propostas estará construída. A capacidade nominal foi usada para estimar o potencial de oferta e a demanda foi calculada com base na demanda prevista de gasolina e na implementação das metas [Global Biofuels Center (2008)].

A análise efetuada mostrou que vários países precisarão aumentar sua capacidade para atender às metas previstas nos próximos anos. Vários países estarão ou continuarão a estar na posição de exportadores de bioetanol durante esses anos: Costa Rica, Jamaica, Paraguai, Peru, Trinidad e Tobago e até mesmo Uruguai. As exportações de todos os países, exceto o Peru, continuarão a ir para os Estados Unidos sob os programas aplicáveis nos termos dos acordos comentados anteriormente. O Peru, especificamente, poderá exportar seus produtos para o mercado americano sob os auspícios do Acordo de Livre Comércio Estados Unidos–Peru, ratificado pelo Congresso norte-americano em dezembro de 2007 [Global Biofuels Center (2008)].

As perspectivas do mercado de bioetanol no caso brasileiro são, evidentemente, diferenciadas dos demais países da região latino-americana, por conta da maturidade de seu programa de biocombustíveis e da grande expansão observada no consumo e na capacidade de produção de bioetanol, como detalhado no capítulo anterior. Também por conta da intensa dinâmica observada nessa agroindústria, estimar cenários futuros não é tarefa simples, já que novos projetos têm sido lançados com freqüência, focando inicialmente o crescente consumo interno de bioetanol. No entanto, para estabelecer um nível de produção e consumo nos horizontes de interesse, foram realizados algumas estimativas, em base conservadora. Para a produção de bioetanol, tomou-se por base a produção estimada para 2008, de cerca de 26,1 bilhões de litros, e consideraram-se uma taxa de crescimento anual de 8%, coerente com a

evolução verificada nas últimas safras, e o número de projetos atualmente em implantação, com 35 novas usinas entrando em operação na safra 2008/2009 e outras 43 unidades devendo partir na safra seguinte [Nastari (2008)], significando uma produção de bioetanol de 30,5 bilhões de litros em 2010, principalmente voltada para o mercado doméstico. No período seguinte, o mercado externo deverá apresentar maior importância e a capacidade de produção de bioetanol deverá alcançar, em 2015, cerca de 47 bilhões de litros, equivalente a uma taxa de crescimento anual de 9% [Milanez et al. (2008)].

Com relação à demanda de bioetanol no mercado brasileiro, estimativas apresentadas há poucos anos se mostraram tímidas e foram largamente superadas pela realidade, principalmente por causa da expansão do mercado de veículos flexíveis. Contudo, essa tecnologia veicular introduz mais incertezas nas projeções de demanda, dada a possibilidade de os usuários escolherem utilizar bioetanol puro ou gasolina (com bioetanol). Por outro lado, o governo pode alterar o teor de mistura de etanol entre 20% e 25%, afetando diretamente a demanda efetiva de bioetanol anidro. Esses fatores, conjugados ao quadro incerto dos preços, ampliam a margem de erro da projeção de consumo. Uma avaliação da evolução da frota de veículos leves no Brasil e dos históricos de consumo de combustíveis indica que, para 2015, a demanda interna de bioetanol poderá estar entre 28 bilhões de litros e 34,3 bilhões de litros, assumindo que 50% e 75% do consumo dos veículos flexíveis, respectivamente, serão atendidos pelo bioetanol hidratado [Milanez et al. (2008)]. Nesse mesmo estudo, são apresentadas diversas projeções do mercado brasileiro de bioetanol, com razoável dispersão entre as estimativas. De modo conservador, analogamente à projeção da oferta, assumiu-se que a maior parte da produção de bioetanol deverá atender o mercado nacional, com uma exportação de 5 bilhões de litros em 2010, valor aproximado das exportações observadas em 2008, e 10 bilhões de litros em 2015, quando o mercado internacional de bioetanol já deverá estar mais bem estruturado. Observe-se que a demanda doméstica de bioetanol corresponde aos usos veiculares e às aplicações industriais, segmento que vem crescendo de modo importante no Brasil.

África

A menor dimensão relativa do mercado africano de combustíveis e a limitada base de informações sobre projetos de biocombustíveis nos diversos países não significam que essa região seja de menor interesse nas avaliações prospectivas para o bioetanol. Na verdade, esse continente apresenta, particularmente em sua porção sul, regiões com evidente e relevante potencial bioenergético, cuja utilização poderá articular-se com outros propósitos de desenvolvimento social e econômico e vem sendo buscada em diversos países.

Desde a década de 1980, existe a disposição de promover o uso de bioetanol na África. Duas iniciativas pioneiras podem ser mencionadas: no Malaui, desde 1982 vem operando a Ethanol Company of Malawi (ETHCO), que fabrica etanol com base no melaço de cana-de-açúcar para fins combustíveis; e no Zimbábue, o programa de bioetanol combustível, lançado em 1980 e descontinuado depois de uma grave seca no começo da década passada,

poderá ser recolocado em operação [Gnansounou et al. (2007)]. Mais recentemente, na Nigéria, efetuaram-se testes com bioetanol na gasolina a partir de 2006 e empresários da África do Sul manifestaram interesse na implementação de unidades produtoras de bioetanol, especialmente após o governo sul-africano ter sinalizado a possibilidade de introduzir mandatoriamente o uso desse biocombustível misturado na gasolina [Alexander (2005)]. Em Gana, implementa-se uma unidade produtora com capacidade de 150 milhões de litros anuais de bioetanol de cana-de-açúcar, em um modelo que poderá ser replicado na Tanzânia e em Moçambique [F.O.Licht (2008b)]. Na atualidade, há pelo menos 11 países no continente criando regras para produção e comercialização de bioetanol, entre eles África do Sul, Angola, Moçambique e Benin. A maioria pretende adotar a mistura de 10% de bioetanol à gasolina [Exame (2007)].

A produção africana de bioetanol de cana-de-açúcar observada em 2006 foi de 439 milhões de litros, sendo a África do Sul responsável por 89% dessa produção. Considerados de forma agregada e preliminar, tendo em vista informações do potencial de consumo interno de gasolina e as perspectivas de exportação associadas às boas condições de produtividade, no continente africano os cenários conservadores de demanda seriam de 1 bilhão de litros e 1,5 bilhões de litros em 2010 e 2015, respectivamente. Por sua vez, a produção em 2010 estaria no nível da demanda, podendo ser considerada uma exportação de 500 milhões de litros em 2015.

É certo que a África tende a ser, a médio prazo, um ator de crescente importância no cenário bioenergético. Em um trabalho conjunto do Ministério das Relações Exteriores e do Ministério da Agricultura, o governo brasileiro tem incentivado o plantio da cana-de-açúcar e a instalação de destilarias em países como Botswana, Congo, Gabão e Tanzânia. Considerando as disponibilidades de solo e as características de clima, acredita-se que os países da região sul do continente com maiores possibilidades para desenvolver programas de produção bioenergética são África do Sul, Zâmbia, Angola, Moçambique, Zimbábue, Malaui e Madagascar, basicamente mediante a diversificação da agroindústria da cana-de-açúcar já existente [Gnansounou et al. (2008)].

Ásia e Oceania

A região da Ásia e da Oceania tem se mostrado ativa na implementação de programas de biocombustíveis e na utilização de recursos agrícolas para produzir biocombustíveis, atendendo a uma demanda doméstica crescente, além de eventuais mercados externos. Entretanto, alguns países asiáticos não foram capazes de alcançar metas ambiciosas a tempo ou demonstram cautela na comercialização de biocombustíveis, por causa da indefinição em temas como preço, oferta em longo prazo, logística e infra-estrutura, além de questões associadas aos receios da compatibilidade dos veículos com biocombustíveis.

As motivações para a promoção dos biocombustíveis são diferentes entre os países asiáticos e da Oceania. Os países desenvolvidos da região, como Austrália, Japão, Nova Zelândia e Coréia do Sul, têm buscado nos combustíveis renováveis uma forma de alcançar as metas do

Protocolo de Quioto para redução das emissões de CO_2 até 2012, independentemente de serem essas metas obrigatórias ou voluntárias. Assim, programas de biocombustíveis foram introduzidos nesses países, principalmente por meio do estabelecimento de metas de produção ou vendas. Entretanto, Japão, Coréia do Sul e Taiwan não possuem terras suficientes para desenvolver cultivos energéticos, por causa da alta densidade populacional, o que limita a produção de biocombustíveis com base em óleos reciclados e rejeitos.

A oferta de longo prazo de matéria-prima é uma questão primordial para esses países. Como exemplo das possíveis linhas de conduta, o Japão apresentou um plano para o desenvolvimento gradual de um programa de biocombustíveis, estabelecendo como meta adicionar bioetanol na gasolina utilizada em volumes correspondentes a 0,6% do consumo veicular de energia fóssil no país até 2010, o que significaria um volume anual de 500 milhões de litros desse biocombustível. Certamente, ainda é um programa modesto, mas que sinaliza uma disposição favorável e começou pela introdução de 7% em volume de ETBE em parte da gasolina comercializada na área de Tóquio em 2007. Considera-se para 2030 a adoção de 10% de biocombustíveis na demanda energética em transportes.

O governo japonês, com suporte da indústria automobilística local, também tem realizado testes com 3% de bioetanol nas cidades de Osaka e Miyakojima, esta última na ilha de Okinawa, onde é cultivada cana-de-açúcar [Global Biofuels Center (2008)]. Recentemente, a Petrobras e a empresa japonesa de comércio exterior Mitsui formalizaram a constituição de uma empresa no Brasil para investimentos em projetos de bioenergia, com a finalidade de produzir etanol para o mercado japonês.

Por sua vez, países em desenvolvimento como China, Índia, Indonésia, Filipinas e Tailândia estão considerando o uso de biocombustíveis com base em excedentes de produção agrícola, sobretudo para reduzir sua dependência de combustíveis convencionais e, ao mesmo tempo, diminuir emissões de impacto local e proporcionar estabilidade aos agricultores. A Indonésia e as Filipinas vão mais adiante, percebendo nos biocombustíveis uma solução para incentivar a atividade econômica e reduzir sua dívida externa. Programas de promoção de biocombustíveis têm sido implementados nesses países, seja por meio do estabelecimento de metas ou de medidas que tornem obrigatórias as misturas de biocombustíveis em certas percentagens.

No caso da China, a meta informada é adicionar 10% de etanol à gasolina em cinco províncias, o que deverá corresponder a uma demanda anual de 1,6 bilhão de litros, a ser paulatinamente incrementada com a entrada de outras províncias no programa. Entretanto, a Índia e a Tailândia, com metas de agregar 10% de bioetanol e um consumo inicial estimado, respectivamente, em 400 milhões e 300 milhões de litros por ano, têm enfrentado obstáculos logísticos na implementação de programas de mistura de bioetanol e se mostram cautelosas com seus programas para o biodiesel [Global Biofuels Center (2008)].

Os derivados de petróleo são fortemente subsidiados na região asiática e na Oceania, estimulando o emprego dos biocombustíveis como uma alternativa para a substituição de combustíveis convencionais. Como resultado, a maior parte dos países está encaminhando a introdução do uso de bioetanol em teores de 5% a 10%, incluindo Austrália, China, Índia, Indonésia, Japão, Nova Zelândia, Filipinas e Tailândia. Existe, atualmente, uma razoável produção de bioetanol na Austrália, na China e na Índia, mas esses países precisarão aumentá-la para alcançar suas metas.

No estudo prospectivo de oferta e demanda para a região, apresentado a seguir, foram incluídos os seguintes países: Austrália, China, Índia, Indonésia, Japão, Nova Zelândia, Filipinas e Tailândia, assumindo que todos alcançarão as metas estabelecidas para a introdução do bioetanol em 2010 e 2015. Como resultado geral para a região, espera-se um desequilíbrio em 2010, com falta de bioetanol, que deverá ser superado até 2015. A Austrália, a Índia e a China precisarão implementar novas unidades de produção para atingir suas metas, cujo atendimento dependerá de importações em 2010, mas que poderão ser superadas pela produção local em 2015. O Japão dependerá exclusivamente de importações. O Japão e a China e, potencialmente, a Austrália e a Nova Zelândia serão grandes importadores de etanol na região. Estima-se que, até 2015, a Índia, a Indonésia e a Tailândia estarão em condições de exportar [Global Biofuels Center (2008)].

Quadro geral de oferta e demanda de bioetanol em 2010 e 2015

Conforme sintetizado no Gráfico 40, as perspectivas de mercado para o bioetanol nas regiões avaliadas durante o período estudado apresentam grandes diferenças e, por conseguinte, as condições e a capacidade de participar de um futuro mercado internacional para esse biocombustível também são diferenciadas. Considerando esses mercados, em termos globais, prevê-se para 2010 uma demanda de bioetanol de 101 bilhões de litros, frente a uma oferta estimada em 88 bilhões de litros, quadro que tende ao equilíbrio em 2015, quando a oferta deverá situar-se próxima a 162 bilhões de litros, para uma demanda no patamar de 150 bilhões de litros.

Em resumo, projeta-se para os próximos anos um significativo crescimento da demanda nos Estados Unidos, particularmente por conta da nova legislação que requer a adição anual de mais de 57 bilhões de litros de bioetanol à gasolina norte-americana até 2015. Por isso, esse país, possivelmente, terá de recorrer à importação, a não ser que novas rotas de produção se viabilizem rapidamente.

Na Europa, tendo em vista a meta de 5% em 2010 e 7,5% até 2015, a demanda de etanol também deverá se expandir de forma significativa. No Brasil, a demanda interna em forte expansão poderá ser bem atendida pela produção local, com um grande potencial de participar ativamente do mercado internacional de bioetanol caso ele se concretize. Para as outras regiões estudadas, espera-se um crescimento moderado. Não obstante, na América Latina e Caribe, vários países precisarão se preparar melhor para alcançar as metas nacionais, além da

eventual expansão da produção voltada para o mercado norte-americano, particularmente naqueles que podem acessar tal mercado em condição privilegiada.

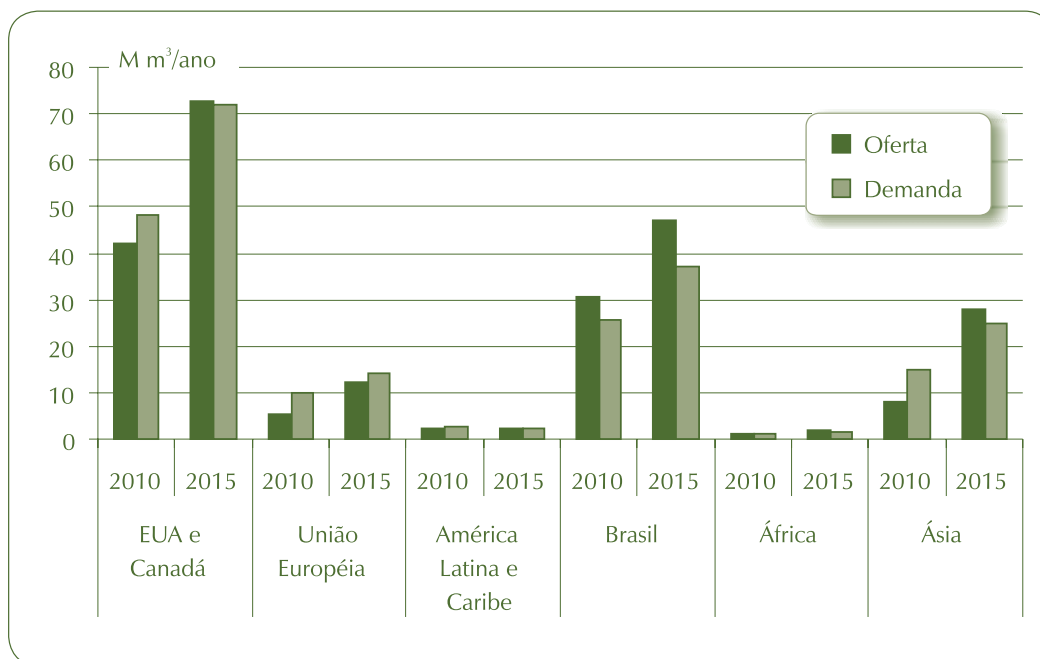
***Gráfico 40* – Estimativas de oferta e demanda de bioetanol combustível para 2010 e 2015**

M m³/ano

80
70
60
50
40
30
20
10
0

Oferta
Demanda

2010 2015 2010 2015 2010 2015 2010 2015 2010 2015 2010 2015

EUA e Canadá
União Européia
América Latina e Caribe
Brasil
África
Ásia

Fonte: Modificado com base em Global Biofuels Center (2008).

Os países asiáticos e da Oceania possivelmente estarão limitados para atender à demanda até 2010, mas avanços deverão ocorrer no período até 2015. Segundo a análise desenvolvida nos parágrafos anteriores, o Japão e a China e, potencialmente, a Austrália e a Nova Zelândia deverão ser os grandes importadores de etanol na região. Por outro lado, até 2015, a Índia, a Indonésia e a Tailândia poderão estar na posição de exportadores, embora, com certeza sem a mesma capacidade que o Brasil [Global Biofuels Center (2008)]. Quanto à África, as incertezas são muito grandes, mas pode-se imaginar um crescimento moderado do mercado interno, com alguma possibilidade de exportação para o mercado europeu, caso ele venha a se expandir em um ritmo mais acelerado.

É importante observar que essas projeções foram desenvolvidas durante o fim de 2007 e o início de 2008, período com grandes indefinições sobre o preço do petróleo. Caso se consolidem os preços de referência dos combustíveis fósseis em níveis elevados, é difícil prever como poderá se comportar a demanda de bioetanol, que atualmente já representa uma das poucas alternativas prontamente disponíveis para substituir a demanda de gasolina.

Para concluir a revisão prospectiva do mercado global de bioetanol, é preciso mencionar que estimar e monitorar os fluxos desse biocombustível no mundo não são tarefas fáceis, por causa das inúmeras restrições ao acesso às informações. Espera-se que a cooperação internacional nesse campo venha contribuir para ampliar a base de dados e informações sobre os mercados de bioetanol, cuja maior transparência traz benefícios para todos os países.

Como condição fundamental para que se desenvolvam nos próximos anos os potenciais de produção e, conseqüentemente, os mercados de bioetanol desenhados nos parágrafos anteriores, comentam-se a seguir as políticas utilizadas para promover os biocombustíveis nos principais países consumidores.

8.4 Políticas de suporte e fomento aos biocombustíveis

No âmbito institucional, as políticas e marcos legais associados aos biocombustíveis, definidos e implementados em grau variável de clareza e objetividade, constituem relevantes elementos que explicam e justificam a evolução da demanda global de bioetanol apresentada nos tópicos anteriores. Para revisar essas políticas, a Tabela 40 apresenta os principais propósitos e motivações dos programas de políticas públicas orientadas para biocombustíveis e eventuais projetos para sua efetiva implementação, com base em documentos oficiais dos vários países e da União Européia [GBEP (2008)].

De acordo com esse levantamento, elevar a segurança energética e mitigar mudanças climáticas estão entre os mais importantes fatores de motivação para programas bioenergéticos na maioria dos países. As questões ambientais estão mais presentes nos países desenvolvidos, enquanto o potencial dos biocombustíveis para promover o desenvolvimento rural é um fator impulsionador destacado para os países em desenvolvimento, propósito quase sempre alinhado a uma agenda de combate à pobreza. O crescimento da utilização de biocombustíveis também é encarado nesses países como uma oportunidade de promover o acesso a uma energia moderna, incluindo eletrificação das áreas rurais. Cabe notar que os objetivos de desenvolvimento rural em países industrializados, de modo diverso, concentram-se na multifuncionalidade da agricultura em termos de alimento e produtos ambientais e culturais.

Em países em desenvolvimento, os objetivos agrícolas vislumbram novas oportunidades, não apenas para a comercialização da produção de cultivos energéticos sofisticados, mas também para a oferta em menor escala de produtos mais acessíveis. Todos os países destacam em suas políticas pelo menos três objetivos centrais e concorrentes, o que pode tornar complexo o desenvolvimento da bioenergia, na medida em que alcançar objetivos múltiplos, muitas vezes não totalmente compatíveis, pode ser uma tarefa difícil. É importante lembrar que o foco no desenvolvimento e na proteção da produção agrícola em alguns países da OCDE levou a programas não-sustentáveis de biocombustíveis [UN-Energy (2007)]. Em poucas palavras, as políticas de promoção dos biocombustíveis orientam-se para múltiplos e desafiadores objeti-

vos, eventualmente além das possibilidades de uma transição de bases energéticas, que, por si só, se configura complexa.

***Tabela 40* – Principais objetivos para o desenvolvimento da bioenergia**

País	Objetivos						
	Mitigar mudanças climáticas	Melhorar o meio ambiente	Aumentar a segurança energética	Promover o desenvolvimento rural	Estimular a agricultura	Fomentar o desenvolvimento tecnológico	Alcançar vantagens econômicas
Países +5							
África do Sul	X		X	X			
Brasil	X	X	X	X	X	X	X
China	X	X	X	X	X		
Índia			X	X		X	X
México	X	X	X	X		X	
Países do G8							
Alemanha	X	X		X	X	X	X
Canadá	X	X	X			X	
Estados Unidos	X	X	X	X	X	X	
França	X		X	X	X		
Itália	X	X	X		X		
Japão	X	X			X	X	
Reino Unido	X	X	X	X			X
Rússia	X	X	X	X	X	X	
União Européia	X		X	X	X	X	

Fonte: GBEP (2008).

Em muitos países, o desenvolvimento e a utilização da bioenergia são orientados principalmente por políticas do setor energético, como apresentado na Tabela 41, com exemplos de medidas adotadas para essa finalidade [GBEP (2008)]. Nessa tabela, as medidas voluntárias, particularmente para os biocombustíveis, referem-se à autorização para mistura com combustíveis convencionais e progressiva introdução no mercado, enquanto os incentivos diretos compreendem os que são financiados pelo poder público, como redução de impostos, subsídios, apoio e garantia a empréstimos relacionados com os biocombustíveis. Observe-se ainda que essa tabela apresenta os instrumentos de políticas energéticas para bioenergia, separando os diferentes usos finais, como aquecimento, geração de eletricidade, transporte, etanol

e biodiesel. As políticas referentes à União Européia são válidas para os países-membros, que podem estabelecer outras medidas de caráter nacional, como mostrado para Alemanha, França e Itália.

***Tabela 41* – Principais instrumentos de políticas energéticas relacionadas à bioenergia**

País	Política energética							
	Metas obrigatórias	Metas voluntárias	Incentivos diretos	Subvenções	Tarifas asseguradas	Conexão compulsória com a rede pública	Critérios de sustentabilidade	Tributos diferenciais
Países +5								
Brasil	T	E	T					Et
China		E,T	T	E,T	E, H	E,H		n/a
Índia	T, (E*)		E	E,H,T	E			n/a
México	(E*)	(T)	(E)			(E)		Et
África do Sul		E, (T)	(E),T					n/a
Países do G8								
Canadá	E**	E**,T	T	E,H,T				Et
França		E*,H*,T	E,H,T		E			Et ; B
Alemanha	E*,T		H	H	E	E	(E,H,T)	Et ; B
Itália	E*	E*,T	T	E, H	E	E		Et ; B
Japão		E,H,T				E		Et ; B
Rússia		(E,H,T)	(T)					n/a
Reino Unido	E*,T*	E*,T	E,H,T	E,H	E		T	Et ; B
Estados Unidos	T	E**	E,T	E,T				Et
União Européia	E*, T	E*,H*, T	T	E,H,T		E	(T)	Et ; B
Convenções								

Tecnologia bioenergética
E: eletricidade
H: aquecimento
T: uso em transporte
Et: produção de etanol
B: produção de biodiesel

*: a meta se aplica a todas as energias renováveis
**: a meta é determinada em nível sub-nacional
(..) : instrumento de política ainda em desenvolvimento ou aguardando aprovação
n/a : não-disponível ou não-informado

Fonte: GBEP (2007).

Como pode ser observado na Tabela 41, a expressiva maioria das medidas de política energética relacionadas ao fomento da bioenergia está associada aos usos para geração de energia elétrica, aquecimento e transporte, com medidas especificamente voltadas para fomentar a produção de etanol e biodiesel apenas no âmbito tributário e alfandegário. De todo modo, a implementação de medidas de política no setor de transporte apresenta imediato nexo com o fomento aos biocombustíveis. Também fica evidente que boa parte das medidas se encontra em desenvolvimento ou aguardando aprovação (apresentado entre parênteses na tabela). Em poucas palavras, os instrumentos para promover o bioetanol são conhecidos e estão em fase de progressiva implementação.

Levantamentos como os efetuados pelo Worldwatch Institute [REN21 (2008)] confirmam os importantes avanços normativos em curso para ampliar o uso do bioetanol. Nos últimos três anos, foram promulgadas instruções normativas ou para a mistura em pelo menos 17 países em nível nacional, a maioria dos quais estabelecia, de forma mandatória, uma mistura de 10% a 15% de etanol com gasolina (ou uma mistura de 2% a 5% de biodiesel com diesel combustível). Poderiam ser citadas também as instruções normativas subnacionais relativas ao bioetanol, com decisões de governos locais em 13 estados da Índia, 9 províncias chinesas, 9 estados dos Estados Unidos, 3 províncias canadenses e 2 estados australianos, comprovando a relevância das condições, possibilidades e interesses locais.

8.5 Conexões entre alimentos e bioenergia

Ao analisar as perspectivas de um mercado global de bioetanol, desenvolvido em bases sustentáveis, é essencial entender as interações entre os mercados de alimentos e a produção bioenergética para uma correta avaliação dos efeitos mais amplos do incremento da produção de biocombustíveis, em suas diferentes configurações produtivas. A preocupante crise no fornecimento de alimentos, com a forte elevação dos preços observada em muitos países durante 2007 e 2008, que coincide com a expansão da produção de biocombustíveis em escala global, confirmou a importância de avaliar adequadamente seu impacto sobre a disponibilidade e o comportamento dos preços dos produtos agrícolas de interesse alimentar.

Esse tema será apresentado neste tópico, inicialmente revisando os conceitos de segurança alimentar e avaliando seus requisitos frente à expansão da produção bioenergética, comentando-se a seguir os principais fatores que afetam o equilíbrio entre a demanda e a oferta de alimentos. O papel atual e potencial dos biocombustíveis nesse quadro é complexo e as conseqüências e implicações da bioenergia sobre a segurança alimentar podem ser exploradas mediante modelos analíticos detalhados, já mencionados no início deste capítulo, para a estimativa do potencial bioenergético, e que serão apresentados como exemplos dos esforços em curso para a adequada compreensão dessa problemática. Como um auxiliar poderoso para o correto discernimento desse quadro, será apresentada a evolução de algumas séries de preços do petróleo, vetores bioenergéticos e bens agrícolas destinados a outros fins.

A segurança alimentar e a produção de bioenergia

A segurança alimentar é um tema central para a FAO, que a define como "a situação em que todas as pessoas, em todos os momentos, têm acesso a uma quantidade suficiente, segura e nutritiva de alimentos para satisfazer as suas necessidades dietéticas e preferências alimentares para uma vida ativa e saudável" [Faurès (2008)]. Ainda segundo essa instituição, a segurança alimentar apresenta quatro dimensões: disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade, que serão analisadas a seguir, considerando em particular sua relação com a expansão da produção bioenergética.

Com relação à primeira dessas dimensões – o impacto da produção dos biocombustíveis sobre a disponibilidade de recursos para produção de alimentos –, é oportuno constatar que a utilização de terras agrícolas para produção de matérias-primas de interesse energético é quase desprezível frente à área total cultivada. Com efeito, atualmente, apenas cerca de 1% das terras aráveis do mundo é utilizada para a produção de biocombustíveis líquidos, com perspectivas de ser incrementada para 3% a 4% em 2030 [BFS/FAO (2008)].

Da mesma maneira, é difícil acreditar que existam restrições efetivas de superfície para produzir alimentos e biocombustíveis quando se considera que as áreas atualmente em cultivo, em todo o planeta (cerca de 1,5 bilhão de hectares), representam aproximadamente 12% das terras cultiváveis. Além disso, uma fração importante da produção atual de grãos é destinada à alimentação animal, atendendo de modo bastante assimétrico às necessidades alimentares da população mundial. Essa situação ocorre, por exemplo, com o milho norte-americano e a soja brasileira, produtos largamente utilizados para formulação de rações animais para sistemas produtivos com uma relação produção/consumo calórico da ordem de 15%.

Com idêntico propósito de produzir proteína animal e apresentando baixíssima eficiência de conversão, a área ocupada por pastagens em todos os países é estimada em 3,5 bilhões de hectares, representados por pastagens nativas de limitada produtividade. Caso se incremente em 1% a produtividade dessas áreas de pastoreio, mediante manejo adequado e uso de forrageiras de melhor desempenho, seriam liberados 35 milhões de hectares, área superior aos 23 milhões de hectares estimados como suficientes para promover a adição de 10% de bioetanol de cana-de-açúcar no mercado mundial de gasolina.

A rigor, não são as limitações de área cultivável que atentam contra a segurança alimentar e restringem as possibilidades de produção de biocombustíveis. Da mesma forma, a crise atual no mercado de produtos alimentares, decididamente, não é uma crise de insuficiência na produção de alimentos. A produção mundial de alimentos tem crescido de forma sistemática e sua oferta por pessoa aumentou 24% nos últimos 40 anos, passando de 2.360 para 2.803 calorias diárias *per capita*, enquanto a população evoluiu de três para seis bilhões de pessoas [FAO apud Ricupero (2008)].

Entretanto, em que pese a existência de terras cultiváveis livres ou esparsamente ocupadas, como visto no início deste capítulo, em nível suficiente para a produção de volumes

apreciáveis de biocombustíveis e, particularmente, de bioetanol de cana-de-açúcar, que demanda uma área bastante reduzida, deve ser reconhecido que têm ocorrido claros desequilíbrios entre a oferta e a demanda de cereais importantes na dieta de muitos países, quadro que tem sido associado de modo simplista à crescente produção de biocombustíveis.

Na verdade, a elevada inflação nos preços dos alimentos circunscreve-se em uma problemática complexa, em que, além da expansão dos mercados bioenergéticos e da demanda de matéria-prima associada, intervêm diversos outros fatores de muito maior peso [Rodríguez (2008a), FAO (2008) e Trostle (2008)]. Pelo lado da demanda, é notável o crescimento do consumo *per capita* de cereais e proteínas animais em mercados importantes, particularmente na Ásia (Índia e China), frente a uma oferta deprimida por problemas conjunturais (devidos basicamente a eventos climáticos) e praticada a custos mais elevados dos insumos agrícolas, com destaque para os efeitos diretos (operações agrícolas, transporte e processamento) e indiretos dos altos preços do petróleo, em especial sobre os fertilizantes. Como fatores agravantes adicionais – que contribuíram sobretudo para a volatilidade dos preços dos últimos dois anos –, podem ser citados a desvalorização do dólar; a política de baixas taxas de juros do Federal Reserve, nos Estados Unidos (para enfrentar a instabilidade do sistema financeiro derivada da crise no setor imobiliário), que levou à busca de alternativa de aplicação em mercados de matérias-primas; e, ligado a isso, o incremento de movimentos especulativos nos mercados internacionais de alimentos [Frankel (2008a e 2008b) e Calvo (2008)]. A explicação sobre a aceleração no aumento dos preços, como resultado da política de baixas taxas de juros seguida pelo Banco Central americano, encontra-se em um marco analítico proposto por Frankel (2006).

Como um dos principais importadores de alimentos na atualidade, com cerca de 20% da população mundial e menos de 10% das terras agricultáveis, a China logrou por décadas manter-se razoavelmente abastecida de cereais com seus próprios recursos agrícolas. Entretanto, com o incremento da renda e a diversificação da dieta, que aumentou a demanda de proteínas animais, as importações de alimentos têm crescido de modo relevante a partir de 2004. A demanda *per capita* de carne na China, que era de 20 kg por pessoa/ano em 1985, elevou-se para 50 kg em 2000, com expectativas de atingir 85 kg em 2030 [SOW-VU (2007)], níveis típicos dos países de médio a alto desenvolvimento. Essa demanda de proteína animal tem elevado significativamente a demanda de grãos, já que, em média, para produzir um quilo de carne suína ou bovina, são requeridos de 5 a 8 quilos de ração.

Apenas considerando a participação brasileira nesse novo mercado, em 2007 foram exportadas 11 milhões de toneladas de soja para a China, que, para a produtividade média nacional de 2,5 toneladas por hectare [Abiove (2008)], significa o comprometimento de 4,4 milhões de hectares com o cultivo dessa oleaginosa, visando atender o mercado chinês, superior à área plantada em cana para fins energéticos no Brasil.

Como indicadores da inflação no mercado internacional de *commodities* agrícolas de interesse alimentar, entre 2000 e 2007, a elevação dos preços dos cereais foi de 225%, inferior,

contudo, ao crescimento de cerca de 330% nos preços do petróleo no mesmo período. O aumento de preços dos alimentos recrudesceu nos últimos anos, especialmente para alguns cereais importantes: de janeiro de 2007 a março de 2008, o milho, o trigo e o arroz tiveram seus preços elevados em 40%, 130% e 82%, respectivamente [Faostat (2008b)]. Adiante, a evolução dos preços será mais bem detalhada, caracterizando um quadro desafiador cujo impacto é maior sobre as nações mais pobres e dependentes da importação de energia e alimentos. Há perspectivas de que esse quadro seja um reflexo de mudanças estruturais na economia mundial e possa permanecer por muitos anos [World Bank (2008)].

A participação do bioetanol de cana-de-açúcar como causa desses desequilíbrios e movimentos de preços é absolutamente marginal, se não nula, pela reduzida área ocupada. Como indicado no capítulo anterior, a área para produção de bioetanol de cana-de-açúcar suficiente para promover a substituição de 10% do consumo mundial de gasolina, hoje, é de cerca de 23 milhões de hectares, equivalente a 1,5% da área cultivada ou 0,2% da área agricultável no planeta. Esse argumento se confirma pelo limitado impacto da produção de bioetanol sobre os preços do açúcar, que tem se mantido em níveis mais ou menos estáveis nos últimos anos, comparativamente aos demais produtos agrícolas, como se apresenta adiante neste capítulo.

O mesmo não pode ser afirmado em relação aos outros biocombustíveis, produzidos com base em bens alimentares essenciais. Um estudo do Fundo Monetário Internacional (FMI) sobre o crescimento da demanda de produtos agrícolas indica que o milho, a soja e a colza terão seus mercados fortemente influenciados pela produção de bioenergia. Um bom exemplo é o da produção norte-americana de bioetanol, que responde por 60% do incremento da demanda global de milho e afeta diretamente seus preços. Com efeito, os Estados Unidos, principal produtor e exportador mundial de milho, deverão estar consumindo anualmente, até 2011, cerca de 30% de sua produção na fabricação de bioetanol. De modo análogo, um aumento da produção européia de biodiesel tende a afetar o mercado de óleos vegetais [IMF (2007)]. Contribui para esse impacto diferenciado o fato de que o milho, ao contrário do açúcar, não encontra substituto de forma imediata.

Nesse sentido, é importante reconhecer que a produção interna de biocombustíveis de baixa produtividade nos contextos norte-americano e europeu apresenta limites evidentes, envolvendo o aproveitamento de nichos de produção, especialmente em casos de excedentes agrícolas, que podem representar um pequeno percentual do consumo interno de combustíveis líquidos nesses países. Tal realidade abre uma janela de oportunidade para a produção racional e sustentável de biocombustíveis no contexto de países tropicais úmidos da América Latina e Caribe, África e Ásia, que aos poucos poderia permitir aos países de alto consumo energético atingir taxas de substituição bem mais elevadas, de 20% a 30%, sem afetar de forma relevante a produção de outros bens agrícolas e com um considerável potencial de desenvolvimento nessas regiões.

Assim, os impactos dos biocombustíveis são claramente diferenciados segundo sua origem. Enquanto o bioetanol de cana-de-açúcar produzido no contexto de países de elevada pro-

dutividade, como os localizados em regiões de clima adequado, pouco afeta a produção de outros bens agrícolas, os biocombustíveis produzidos em grande escala no contexto norte-americano e europeu impactam diretamente e de modo crescente a disponibilidade de produtos alimentares. Além disso, seu impacto sobre a demanda de produtos agrícolas é agravado pelas práticas protecionistas amplamente adotadas pelos países industrializados, com sérias implicações, em pelo menos duas vertentes. Por um lado, a manutenção de preços de proteção para seus agricultores pressupõe a existência de barreiras tarifárias que dificultam ou impedem o acesso de produtos agrícolas oriundos dos países em desenvolvimento aos mercados dos países industrializados, desestimulando a produção para exportação. Por outro lado (e pior), os excedentes da produção subsidiada desequilibram de modo perverso o mercado mundial de bens agrícolas, aviltando os preços internacionais e desestruturando a produção de alimentos na maioria dos países de menor renda.

Como exemplo eloqüente das conseqüências das distorções de preços no mercado de bens agrícolas, a grande produção de milho nos Estados Unidos, com excedentes exportados a preços inferiores aos custos, promoveu a redução gradual de seu cultivo em tradicionais produtores da América Latina, como México, Colômbia e Guatemala, que, apesar de milenares praticantes da agricultura desse cereal, passaram a depender da importação do produto norte-americano para sua dieta básica. Levará algum tempo até que se coordenem de forma adequada as políticas agrícolas nacionais e se harmonizem com as demandas das políticas energéticas, resolvendo a presente crise. Nessa direção, é essencial o papel das políticas públicas consistentes para o desenvolvimento sustentável dos biocombustíveis [Rodríguez (2007)].

Naturalmente que os subsídios à produção agrícola podem ser instrumentos legítimos de política pública. Contudo, grande parte dos mais de US$ 280 bilhões aplicados, por ano, pelos países da OCDE no suporte aos seus agricultores, que representam, em média, 30% do rendimento bruto da atividade rural [OCDE (2007b)], tem servido para reduzir, de modo perverso, a produção de alimentos nos países em desenvolvimento. A revisão desses subsídios é um dos temas mais espinhosos da agenda do comércio internacional, mas necessita ser encaminhada urgentemente, como condição básica para a retomada da racionalidade na produção agrícola mundial. Esse contexto se estende aos biocombustíveis, um setor no qual pesados subsídios bloqueiam o comércio internacional e justificam sistemas produtivos ineficientes, que terminam por desperdiçar bens alimentares, com pífios benefícios para a redução da mudança climática. Em síntese, a segurança alimentar pode ser afetada caso os biocombustíveis sejam produzidos de forma inadequada, com baixa produtividade energética e utilizando recursos naturais de forma irresponsável. No entanto, esse não é o caso do bioetanol de cana-de-açúcar.

As outras dimensões da segurança alimentar são afetadas de modo menos intenso e evidente pela produção dos biocombustíveis. O acesso aos alimentos se refere à condição em que as pessoas tenham os recursos suficientes para adquirir alimentos adequados e obter uma alimentação nutritiva. Depende primordialmente das condições de renda da população e da infra-estrutura de transporte, armazenamento e distribuição. Isso tende a ser favorecido nos contextos em que a produção bioenergética dinamize o sistema produtivo rural e amplie a

renda das famílias. Mas, por outro lado, pode ser afetado negativamente quando a produção de biocombustíveis causa aumentos significativos no preço dos alimentos, que reduzem o poder de compra da população. Esse efeito seria maior nos países ou regiões em que uma proporção significativa da renda é gasta com alimentos.

Finalmente, a dimensão estabilidade se refere à condição em que uma população, um local ou uma pessoa têm acesso a alimentos adequados em qualquer momento; portanto, refere-se tanto à dimensão da disponibilidade quanto à do acesso à segurança alimentar. A produção de biocombustíveis pode afetar a estabilidade se substituir a produção de alimentos (disponibilidade). Também pode afetá-la se gerar aumentos significativos no preço dos alimentos (efeito negativo no acesso) ou incrementar a renda dos agricultores (efeito positivo no acesso). Um exemplo concreto é oferecido pelo bioetanol de cana-de-açúcar no Brasil, cuja produção estimulou o incremento da produção de cana, embora essa matéria-prima seja parcialmente desviada para a fabricação de açúcar sempre que seu preço se mostra suficientemente atrativo. Por outro lado, preços motivadores do bioetanol frente ao açúcar tendem a reduzir a oferta de açúcar e estabilizar seu preço. Esses impactos positivos sobre a estabilidade tendem a ser mais efetivos quando os mercados bioenergético e alimentar se mostram mais integrados e menos afetados por barreiras alfandegárias.

Em conclusão, a base de recursos naturais disponíveis no planeta é amplamente suficiente para a produção bioenergética sustentável em volumes razoáveis, com reduzido impacto em outras atividades, desde que sejam adotadas rotas tecnológicas racionais, como o bioetanol de cana-de-açúcar, que, por seus indicadores diferenciados de produtividade, dificilmente pode ser associado a uma crise de oferta e de preços dos alimentos. Além disso, em um sentido amplo, a adoção de tecnologias mais eficientes, que reduzam perdas e racionalizem os sistemas produtivos agropecuários, possivelmente será ainda mais importante do que a larga disponibilidade de recursos naturais como fator mitigador da disputa entre a produção de alimentos ou bioenergia (e outros produtos agrícolas não-alimentares) por terras e demais recursos produtivos.

Com efeito, o incremento da produtividade oferece uma alternativa imediata à maior demanda de produtos do campo que a expansão da bioenergia coloca. Um bom exemplo desse processo de tecnificação e densificação é o aumento da produção de carne bovina e leite no Brasil nos últimos anos, que mostram como as áreas de pastagem, manejadas adequadamente e cultivadas com forrageiras de maior qualidade, podem suportar um número maior de animais, liberando terras para outros fins. A esse respeito, são expressivos os indicadores dos últimos 20 anos: a área de pastagem nas propriedades rurais brasileiras se reduziu em quase 4%, período em que o rebanho se ampliou em 32% e a produção leiteira cresceu 67% [IBGE (2008)]. Analisando esse tema de outra forma, em 2005, a densidade média de bovinos praticada na pecuária brasileira era de aproximadamente uma cabeça por hectare, enquanto no Estado de São Paulo essa densidade alcançava 1,4 cabeça por hectare, ou seja, 40% mais. Caso as fazendas brasileiras passem a trabalhar no nível de produtividade observado em São Paulo, seriam liberados para agricultura entre 50 milhões e 70 milhões de hectares [Jank (2007)], como já afirmado, representando de duas a três vezes a superfície

necessária para produzir bioetanol suficiente para a adição de 10% de bioetanol na gasolina de todos os países.

Confirmando o exposto acima, um grupo multidisciplinar chegou, recentemente, a um consenso [Best et al (2008)] de que os aumentos recentes nos preços das *commodities* agrícolas podem ser atribuídos, na sua maioria, a fatores que não estão relacionados à produção de biocombustíveis. Como principais fatores responsáveis por esse aumento, esse estudo apontou a crescente demanda por alimentos e rações para animais, a especulação financeira nos mercados internacionais de produtos alimentares e quebras de colheita causadas por eventos climáticos extremos. Além disso, os altos preços do petróleo e os altos custos relacionados de fertilizantes têm um impacto considerável sobre os preços internacionais dos produtos agrícolas.

Modelos de avaliação do impacto da produção bioenergética sobre a segurança alimentar

Uma das maneiras utilizadas para avaliar a viabilidade da expansão da produção bioenergética, em um sentido amplo, tem sido por meio de modelos analíticos que relacionem os vários sistemas produtivos e socioeconômicos envolvidos, com suas funções de produção e demanda definidas mediante equações matemáticas, refletindo a base de informações e dados existente. Tais modelos pretendem simular os efeitos da produção de biocombustíveis em contextos e cenários previamente definidos, para auxiliar na tomada de decisões e na implementação de políticas no campo agrícola e bioenergético.

Como uma das mais relevantes iniciativas nesta direção, a FAO lançou em 2007 o Projeto de Bioenergia e Segurança Alimentar (Bioenergy and Food Security Project – BEFS) [FAO (2008c)], que vem desenvolvendo uma estrutura analítica para avaliar as conexões entre bioenergia e segurança alimentar, propondo um modelo a ser aplicado em países específicos. Espera-se que esse projeto contribua para o debate que ocorre atualmente em muitos países, caracterizando os benefícios e problemas associados à maior utilização da bioenergia. Na Figura 30, mostrada anteriormente, sintetiza-se a ampla rede de interações que se busca compreender e modelar nesse projeto.

Em especial, o objetivo da estrutura analítica é avaliar o impacto de diferentes esquemas de produção e utilização bioenergética para a segurança alimentar, que são específicos para cada país. O foco da análise entre a bioenergia e a segurança alimentar é a mudança de renda e de preços dos produtos agropecuários. Essas mudanças dependem principalmente das variações nos padrões de uso da terra, dos níveis de produção de bioenergia e alimentos e dos preços de mercado dos alimentos e energia. Após a seleção de um cenário determinado em um país, especificando os contextos produtivos e as demandas para alimentos, bioenergia e outros produtos agrícolas, são necessárias cinco etapas para a realização da análise:

i) determinação do "potencial técnico" para bioenergia, por meio do modelo comentado no início deste capítulo [Smeets et al. (2006)];

ii) estimativa das curvas de custo para a oferta de alimentos e bioenergia;

iii) estimativa dos “potenciais econômicos” para bioenergia;

iv) estimativa dos impactos macroeconômicos da produção bioenergética sobre a renda, emprego e preços; e

v) avaliação do impacto das mudanças na renda, preço e emprego na segurança alimentar.

Pretende-se, assim, avaliar de forma desagregada os diferentes grupos populacionais que podem ser afetados pelo desenvolvimento da bioenergia, dependendo do cenário para sua expansão no país estudado. Estudos-piloto desse projeto encontram-se em implementação no Peru, na Tanzânia e na Tailândia, com perspectivas de serem expandidos para outros países.

Outros modelos similares e com menor complexidade têm sido apresentados, como nos estudos realizados pelo Instituto Internacional de Pesquisa de Política Alimentar (International Food Policy Research Institute – IFPRI) e pelo Departamento de Agricultura do governo norte-americano (United States Department of Agriculture – USDA). No caso do IFPRI, o Modelo Internacional para a Análise de Política de Commodities e Comércio Agrícola (International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade – Impact), foi utilizado para avaliar as condições futuras de oferta e consumo de alimentos e segurança alimentar para o ano 2020 e anos posteriores, considerando três categorias de demanda – alimentos humanos, rações animais e outros usos –, ajustadas para considerar os biocombustíveis. As matérias-primas consideradas foram milho, cana-de-açúcar, beterraba, trigo e mandioca, para a produção de bioetanol, e soja e outras sementes oleaginosas, para o biodiesel. Com base nas projeções de demanda de biocombustível pelos países e regiões pertinentes, a produção de biocombustível, nesse modelo, foi considerada em três cenários de produtividade e tecnologias.

Entre as principais conclusões desse estudo, sinaliza-se um incremento significativo nos preços dos produtos agrícolas, especialmente da mandioca, sobretudo quando a produtividade agroindustrial é baixa, o que confirma a importância de a bioenergia ser desenvolvida em um marco de eficiência [IFPRI (2006)].

O modelo utilizado pelo USDA para avaliações dos preços agrícolas frente à expansão da produção de biocombustíveis, desenvolvido pelo Serviço de Estudos Econômicos (Economic Research Service – ERS) desse órgão, apresenta um quadro um pouco diferente, no qual o perfil da demanda (com o incremento da demanda de proteínas animais), os efeitos climáticos e os preços da energia têm um papel mais significativo do que a bioenergia sobre o aumento dos preços. Nessa direção, esse estudo aponta que apenas 3% da inflação observada nos preços do milho se devem à produção de bioetanol e indica que os altos preços do petróleo são a causa mais importante. Revendo a evolução dos preços entre 1992 e 2008, observa-se que o petróleo aumentou 547%, as *commodities* (basicamente metais) subiram 286%, em geral, e os alimentos se elevaram em 98%, estimando-se que ao longo dos próximos anos o mercado se equilibre em níveis mais adequados [ERS (2008)].

A expressiva diferença de visões que os dois modelos anteriores apresentam aponta para uma fragilidade inescapável da abordagem por modelos matemáticos, associada à dificuldade

de simular sistemas complexos, sob condições permanentemente transitórias e com comportamentos tipicamente estocásticos. A saída usual tem sido ampliar a complexidade das matrizes utilizadas, aumentando o número de variáveis e expondo como contrapartida uma crônica carência de dados suficientemente detalhados para que o modelo concebido possa ser calibrado e implementado. Mantém-se, assim, a visão estática da realidade, o que limita bastante seu alcance no tempo e a robustez de suas indicações em contextos mais variados. Não obstante, tais modelos são ferramentas de efetivo interesse, que compensam a escassa capacidade preditiva pela efetiva aplicação como ferramenta exploratória de cenários, possivelmente de forma mais qualitativa do que quantitativa. Acredita-se que poderão ser desenvolvidos modelos mais elaborados, que incorporem lógicas adaptativas, e capazes de simular dinamicamente as interações entre os sistemas socioeconômicos e a bioenergia.

Evolução dos preços internacionais de interesse para o binômio alimentos-bioenergia

Com o propósito de dar mais consistência à relevante discussão sobre os nexos entre a produção de biocombustíveis e a disponibilidade de alimentos, bem como para procurar caracterizar eventuais correlações entre os preços dos diferentes grupos de produtos, a Unidade de Desenvolvimento Agrícola da Cepal elaborou, com base em dados do Banco Mundial, diversas figuras que sintetizam a evolução dos preços internacionais mais relevantes entre março de 1990 e março de 2008. Essas figuras são apresentadas a seguir, partindo de um caso mais geral e caminhando no sentido de comparações mais específicas. Foram consideradas as diferentes categorias de produtos agrícolas comercializados internacionalmente (*commodities*), agregados segundo sua relação direta, indireta ou não-relevante com a produção de biocombustíveis. Como exemplos de produtos do primeiro grupo, incluem-se o açúcar (que acompanha o preço da cana-de-açúcar), o milho, o óleo de soja e o óleo de palma, enquanto, no segundo grupo, figuram a carne e o trigo e, no último grupo, foram considerados o cacau, o café arábica e robusta, chá e bananas. Não se pretende com esses gráficos demonstrar relações de causa e efeito, mas constatar e avaliar a crescente correlação no comportamento dos preços nos mercados internacionais do petróleo e dos produtos agrícolas, que pode ser explicada por diversas razões, entre as quais a expansão da bioenergia.

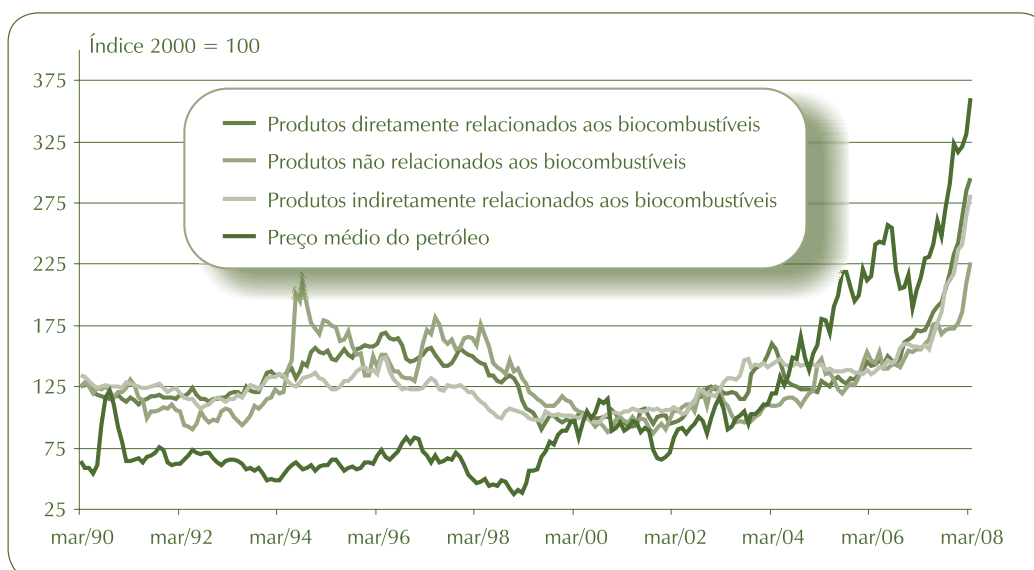
O Gráfico 41 ilustra a evolução dos índices de preços do petróleo bruto e três índices simples de preços de produtos agrícolas, agrupados conforme indicado no parágrafo anterior. Desde o início de 2002, mais ou menos, os preços de todos os produtos agrícolas seguiram a tendência geral determinada pelo petróleo bruto, tendência que se tornou mais clara a partir de março de 2007, quando as matérias-primas direta ou indiretamente relacionadas com o biocombustível cresceram em uma taxa bastante similar à do petróleo bruto e de modo bem mais rápido do que a dos produtos não relacionados aos biocombustíveis.

No Gráfico 42, faz-se a distinção entre os produtos associados ao biodiesel (óleos vegetais, de soja e de palma) e ao bioetanol (açúcar e milho). Os dois grupos de produtos mostram uma tendência de subida dos preços desde o início de 2002, mas, durante os dois últimos anos,

as matérias-primas relacionadas ao biodiesel têm subido a um ritmo bem mais rápido do que os produtos associados ao bioetanol, aproximando-se bastante da taxa de crescimento dos preços do petróleo bruto.

***Gráfico 41* – Índices de preço para petróleo bruto e produtos agrícolas (Média 2000 = 100)**

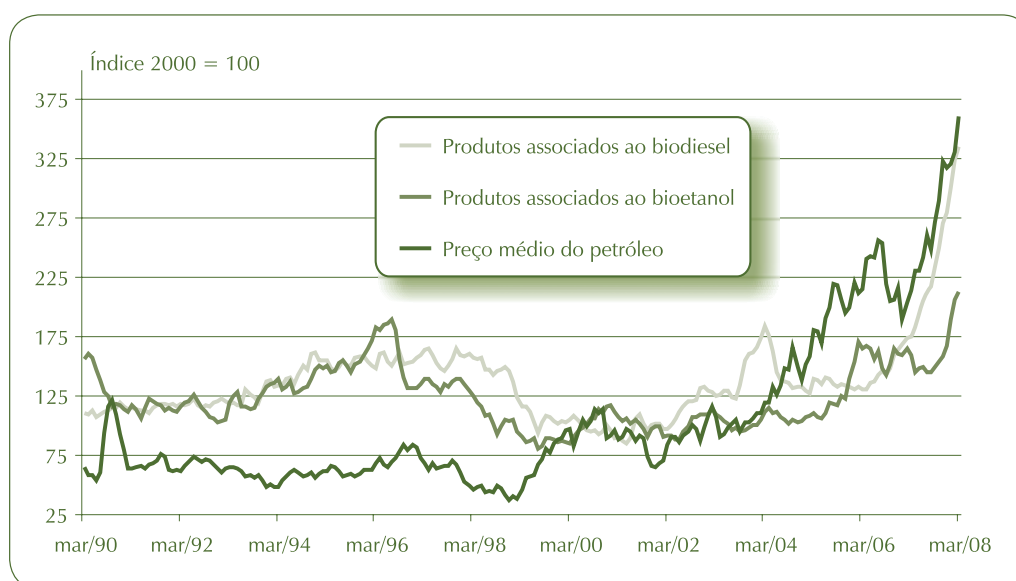
Índice 2000 = 100

Produtos diretamente relacionados aos biocombustíveis
Produtos não relacionados aos biocombustíveis
Produtos indiretamente relacionados aos biocombustíveis
Preço médio do petróleo

Fonte: Rodríguez (2008b).

No Gráfico 43, são discriminados os produtos diretamente associados ao bioetanol. É interessante observar que os preços do milho e do açúcar, as duas *commodities* relacionadas ao bioetanol incluídas nessa análise, evoluíram em direções opostas, especialmente desde 2002 e até a metade de 2007. Desde então, ambos os preços têm aumentado de maneira constante, acompanhando o crescimento nos preços do petróleo bruto.

O preço do petróleo bruto atingiu um pico em julho de 2006, teve uma queda até janeiro de 2007 e tem aumentado a uma taxa constante desde então. Os preços do açúcar e do milho entraram em queda após esse pico, mas a redução foi mais significativa e durou mais para o açúcar do que para o milho. Mais recentemente, os preços dos dois produtos voltaram a aumentar, acompanhando a escalada nos preços do petróleo bruto que começou em fevereiro de 2007, mas com um atraso: a retomada da elevação dos preços foi em maio de 2007, para o milho, e outubro de 2007, no caso do açúcar. Entretanto, o aumento foi bem maior no caso do milho, o qual atingiu o seu mais alto preço médio mensal em março de 2008, 14,4% maior do que o pico histórico anterior, em maio de 1996. Por sua vez, o preço médio do açúcar, em março de 2008, ficou 27% abaixo do nível atingido no pico histórico de fevereiro de

2006. Em outras palavras, o preço do açúcar, que se correlaciona diretamente com o preço da cana-de-açúcar, tem aumentado bem menos que o do milho.

***Gráfico 42* – Índices de preço para petróleo bruto e produtos agrícolas associados ao bioetanol e ao biodiesel**
(Média 2000 = 100)

Fonte: Rodríguez (2008b).

Para concluir a exploração do comportamento dos preços e confirmando as constatações anteriores, a Tabela 42 resume a relação entre a evolução dos preços do petróleo e os preços dos produtos agrícolas diretamente ligados aos biocombustíveis. Por esses dados, fica evidente como, de um modo geral, vem aumentando ao longo do tempo sua correlação. Nessa tabela, utiliza-se o coeficiente de correlação simples, parâmetro estatístico que, à medida que se aproxima da unidade, indica o quanto mais forte e positiva é essa correlação. Valores nulos indicam ausência de correlação e valores negativos sinalizam correlação negativa, isto é, os comportamentos divergem. De acordo com os valores da Tabela 42, para o bioetanol, existem diferenças importantes entre o milho e o açúcar, e, no caso do biodiesel, há uma mudança na relação entre seus preços e os preços de petróleo na década de 1990, durante a qual ela foi fraca e negativa, em direção a uma relação forte e positiva após 2000, fortalecendo-se ainda mais após 2005.

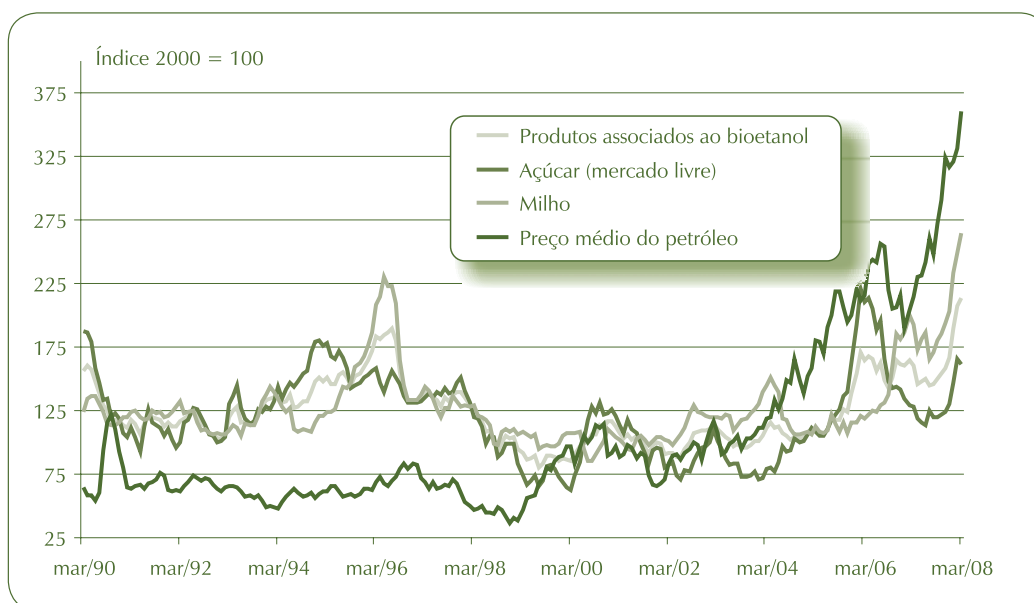
***Gráfico 43* – Índices de preço para petróleo bruto e produtos agrícolas associados ao bioetanol**
(Média 2000 = 100)

Fonte: Rodríguez (2008b).

***Tabela 42* – Coeficientes de correlação simples entre os preços do petróleo e os preços dos produtos diretamente associados aos biocombustíveis, entre janeiro de 1990 e março de 2008**

Produto	Período			
	1990 a 2008	1990 a 1999	2000 a 2008	2005 a 2008
Milho	0.43	0.04	0.76	0.74
Açúcar	0.21	0.03	0.68	0.22
Óleo de soja	0.61	-0.41	0.82	0.89
Óleo de palma	0.42	-0.44	0.81	0.86

Fonte: Rodriguez (2008b).

Conforme indicado nos Gráficos 41, 42 e 43 e na Tabela 42, há uma correlação clara entre os preços do petróleo e dos produtos agrícolas relacionados aos biocombustíveis, embora em níveis bem menores no caso do açúcar, associado à cana-de-açúcar, do que para outros insumos de bio-

etanol. À medida que a pesquisa nesse campo se expandir e mais dados forem disponibilizados, o debate internacional se tornará mais rico e as diversas influências sobre os preços mundiais de alimentos ficarão cada vez mais claras, reduzindo as especulações nesse tema.

8.6 Fatores de indução para um mercado global de bioetanol

De uma ampla perspectiva, a adoção do bioetanol como um componente da matriz energética mundial associa-se a alguns fatores que cumpre mencionar, pela relevância própria e o crescente significado no conjunto de motivações que suportam esse biocombustível. O presente capítulo procurou mostrar a existência de potenciais produtivos robustos, demandas crescentes e mercados em consolidação, com impactos limitados sobre a disponibilidade de alimentos e seus preços. Dos parágrafos anteriores, sobressai ainda a grande importância que apresentam as ações de Estado, como balizador desse processo, para potencializar suas vantagens e atenuar seus riscos sob a égide dos interesses maiores da sociedade. Exatamente nesse âmbito, cabem alguns comentários complementares, ressaltando os temas relativos ao papel do bioetanol de cana-de-açúcar na agenda ambiental global e no quadro das negociações internacionais para fortalecer o comércio entre os países.

Desafios ambientais globais e o bioetanol

Os biocombustíveis, como o bioetanol, têm sido discutidos de maneira explícita nas negociações globais relativas ao meio ambiente, principalmente na Convenção sobre Diversidade Biológica (Convention on Biological Diversity – CBD) e na Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima. A seguir, resumem-se os pontos mais importantes nessas negociações.

No âmbito da Convenção sobre Diversidade Biológica, os biocombustíveis foram o assunto de uma recomendação específica da 12ª sessão do Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice (SBSTA), ou Organismo Auxiliar para Aconselhamento Científico, Técnico e Tecnológico, dessa convenção [CBD (2008)]. Tal recomendação se refere aos aspectos positivos e adversos da produção de biocombustíveis líquidos e sua utilização para a "biodiversidade e bem-estar humano", indicando que os efeitos benéficos surgem quando sua produção e seu uso estão associados, entre outros aspectos, com: a redução no consumo de combustíveis fósseis; a redução no uso da terra para fins agrícolas associados com o aumento na produção de energia; a diminuição do uso da água das plantações; a redução na conversão de terras agrícolas para outros fins; e o aumento da renda e das oportunidades econômicas em áreas rurais.

Por outro lado, a mesma recomendação indica que os efeitos adversos surgem quando o uso e a produção de biocombustíveis são associados com: a perda, a fragmentação e a degradação de biomas valiosos, tais como florestas naturais, campos, pântanos e terras

turfosas e outros depósitos de carbono, seus componentes de biodiversidade, com perda dos serviços essenciais dos ecossistemas e aumentos nas emissões de gases de efeito estufa devido a essas mudanças; a concorrência pela terra com plantações alternativas, incluindo a terra administrada por comunidades indígenas e pequenos agricultores, e a concorrência com a produção de alimentos, que pode levar à insegurança alimentar, aumento no consumo de água, maior aplicação de fertilizantes e pesticidas, aumento da poluição de água e eutrofização, degradação e erosão do solo; o cultivo não-controlado, a introdução e a propagação de organismos geneticamente modificados; a introdução descontrolada e a disseminação de espécies estranhas; e as emissões da queima de biomassa, com possíveis efeitos adversos para a saúde humana.

Dessa forma, as recomendações da CBD/SBSTA convergem para muitos temas relativos à sustentabilidade da produção de bioetanol de cana-de-açúcar discutidos em capítulos precedentes, como os relativos aos balanços de energia e emissões (locais e globais), impactos sobre os recursos naturais, diversidade biológica, produção agrícola, uso da terra e critérios sociais.

No contexto dos fóruns da Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima, os biocombustíveis têm sido discutidos por suas importantes relações com a mudança climática e as emissões de gases de efeito estufa, decorrentes do uso de combustível e das atividades de reflorestamento/desmatamento, mudança no uso da terra e outras adaptações e reduções nas alterações do clima [UNFCCC (2008)]. O Protocolo de Quioto, decorrente dessa convenção, estabelece metas e compromissos para os países industrializados na redução das emissões, identificando mecanismos que permitem que esses países adquiram e comercializem créditos em emissões por meio de projetos implantados em países em desenvolvimento, os quais podem usar para cumprir seus compromissos. Entre eles, destaca-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), cujos projetos devem ser associados a objetivos de desenvolvimento sustentável, envolvendo atividades que não teriam ocorrido de outra forma e resultem em reduções reais e mensuráveis de emissões.

Os dois tipos mais comuns de projetos apresentados estão relacionados ao uso da terra e à produção de energia, confirmando o potencial para projetos voltados para a produção e o uso de bioetanol, ainda pouco explorado. Não obstante, existem exemplos de diversos projetos MDL em andamento ou planejados relacionados à bioenergia, com informações disponíveis sobre as metodologias a serem utilizadas para o cálculo da redução das emissões [CDM (2008)], como já comentado anteriormente neste livro para a co-geração com bagaço de cana.

Certamente, um mercado de bioetanol expandido, se promovido com critérios de sustentabilidade, deve contribuir para que os países produtores e consumidores desse biocombustível possam cumprir os objetivos dos acordos ambientais internacionais.

Comércio internacional de bioetanol

Como já observado neste capítulo, existem desafios importantes associados à formação de um mercado internacional para o bioetanol. Por exemplo, medidas alfandegárias de caráter protecionista e padrões de qualidade desequilibrados podem afetar as oportunidades dos países em desenvolvimento, potenciais produtores, no acesso ao mercado internacional de bioetanol, do mesmo modo como são restritivas as medidas que buscam exclusivamente o incremento da produção em países industrializados. Existe também a preocupação de que o aumento nas tarifas sobre biocombustíveis nos mercados de países industrializados obrigue os países em desenvolvimento a exportar insumos, tais como correntes açucaradas e óleos vegetais em bruto, deixando a fase industrial da produção dos biocombustíveis, com os benefícios associados pela agregação de valor, para o país importador. Como exemplo de políticas protecionistas, as atuais barreiras tarifárias, como a taxa *ad valorem* de 6,5% sobre importações de biodiesel para a União Européia e a tarifa de 0,54 US$/galão (0,142 US$/litro) sobre o etanol importado pelos Estados Unidos, restringem o comércio dos países em desenvolvimento com alguns dos mais importantes mercados consumidores para a bioenergia.

Alguns acordos e iniciativas de promoção de comércio preferencial da União Européia e dos Estados Unidos têm sido desenvolvidos nos últimos anos, procurando oferecer oportunidades para que países potencialmente exportadores de bioetanol se beneficiem do aumento da demanda global por biocombustíveis. Nessa linha, o comércio preferencial da União Européia com países em desenvolvimento se enquadra no Generalised System of Preferences (GSP), ou Sistema Generalizado de Preferências, dos países europeus, em cujo âmbito se encontram a iniciativa Everything But Arms (EBA), ou Tudo Menos Armas, e o Acordo de Cotonou (sucessor da Convenção de Lomé), que afetam o setor de bioetanol. De acordo com o GSP atual, em vigor até o dia 31 de dezembro de 2008, o acesso à União Européia livre de tarifas é oferecido ao álcool desnaturado ou não-desnaturado para os países enquadrados. O GSP também tem um programa de incentivo para produtores e exportadores de etanol que aderem aos princípios de desenvolvimento sustentável e à boa governança [European Commission (2005)]. A iniciativa do EBA oferece, aos países menos desenvolvidos, acesso livre de tarifas e de cotas para as exportações de etanol, ao passo que o Acordo de Cotonou oferece acesso livre a certas importações vindas de países de baixa renda da África, do Caribe e da região do Pacífico. De forma similar, o Acordo Euro-Mediterrânico (Euro-Mediterranean Agreement) também tem disposições para o comércio preferencial em biocombustíveis para certos países no Oriente Médio e no Norte da África.

Nos Estados Unidos, como visto, o etanol pode ser importado sem tarifas desde certos países do Caribe sob a Iniciativa da Bacia do Caribe (Caribbean Basin Initiative), embora existam restrições específicas (quantitativas e qualitativas), dependendo do país de origem da matéria-prima, como visto anteriormente. Também foram propostas disposições para importações de etanol livre de tarifas nas Negociações Comerciais de Livre Comércio entre a América Central e os Estados Unidos [Yacobucci (2006)]. Embora esses acordos não alterem o quadro geral de restrições ao comércio de biocombustíveis, representam saudáveis exceções e devem ser valorizados.

As questões-chave para a promoção do comércio internacional de bioetanol incluem: a classificação para fins tarifários dos produtos biocombustíveis como bens agrícolas, industriais ou ambientais; o papel dos subsídios no aumento da produção; e a consistência entre as diversas medidas em âmbito doméstico e os requisitos da Organização Mundial do Comércio (OMC). Visto que a agroindústria dos biocombustíveis não existia quando as regras atuais da OMC foram elaboradas, os biocombustíveis não estão sujeitos ao sistema de classificação HS (Harmonized Standard ou Norma Harmonizada). Isso cria incertezas, pois é essa norma que caracteriza os produtos dentro dos acordos específicos da OMC. Por exemplo, o bioetanol é considerado um produto agrícola e, portanto, está sujeito ao Anexo 1 do Agreement on Agriculture (AoA), ou Acordo sobre Agricultura, da OMC, enquanto o biodiesel é considerado um produto industrial e, dessa forma, não está sujeito às regras do AoA.

Alguns membros da OMC têm sugerido que combustíveis renováveis, incluindo o bioetanol, deveriam ser classificados como "produtos ambientais" e, portanto, estariam sujeitos a negociações sob o grupo de "Produtos e Serviços Ambientais" [Steenblik (2005)]. Nesse contexto, nos comitês para o desenvolvimento da Rodada de Doha, promovida pela OMC para diminuir as barreiras comerciais em todo o mundo, foram iniciadas negociações sobre "a redução ou, conforme apropriado, a eliminação de barreiras tarifárias ou não-tarifárias para bens e serviços ambientais", mas as discordâncias ainda continuam sobre a identificação dos produtos ambientais, sobre o escopo e abordagem a ser utilizada na liberação do comércio nesses produtos e sobre mecanismos para atualizar regularmente a lista de produtos.

Os biocombustíveis continuarão a ser um fator importante nas tratativas da Rodada de Doha. Alguns analistas têm sugerido que, por seu impacto nos mercados agrícolas, os biocombustíveis podem salvar as negociações sobre o comércio agrícola que vêm sendo encaminhadas com dificuldade pela OMC [Turner (2006)]. Outros são mais pessimistas e consideram que

> as novas oportunidades comerciais que estão sendo abertas nos países industrializados com o forte interesse em biocombustíveis provavelmente não serão protegidas pelo sistema baseado em regras da OMC, mas na forma menos confiável de decisões unilaterais de um país para permitir que importações atendam uma determinada demanda doméstica [IIED (2007)].

Nesse esquema, uma tarifa poderia continuar a existir, mas não seria aplicada, ou uma tarifa mais baixa seria aplicada para um determinado volume de importações, antes que a tarifa máxima fosse aplicada. Desse modo, caso seja possível comprovar que as importações são politicamente sensíveis, porque os produtores ou processadores locais foram ameaçados, ou porque os padrões ambientais existentes na produção do biocombustível importado foram considerados inadequados pelos consumidores, as fronteiras poderiam fechar novamente, sem possibilidade de recurso para o país ou empresa exportadora.

As condições que cercam a Rodada de Doha reproduzem bem as dificuldades para as negociações globais na construção de um mercado saudável para os biocombustíveis, e é nesse

contexto que os países produtores têm de tomar decisões e definir estratégias para o fomento ao bioetanol, visando atender adequadamente às suas perspectivas de desenvolvimento e às demandas de energia, agricultura e comércio. Essas estratégias deverão ser avaliadas à luz dos benefícios econômicos, eqüidade desses benefícios, limites ambientais, balanços energéticos nacionais e oportunidades internacionais de comércio, considerando a entrada em um futuro mercado internacional de bioetanol ou priorizando o uso do bioetanol nacional para o desenvolvimento rural e para fornecimento de energia para uso doméstico.

Essas decisões dependerão principalmente da perspectiva que um país estabelece para o bioetanol. Uma visão de curto prazo para as partes produtoras e compradoras aumentaria o enfoque sobre as exportações e a garantia do suprimento energético, enquanto uma visão de longo prazo poderia dar preferência à igualdade social no desenvolvimento rural e aos benefícios ambientais mundiais. Entretanto, é importante notar que os mercados nacionais podem pavimentar o caminho para o comércio internacional ao estabelecer a infra-estrutura necessária e fornecer a experiência na gestão dos sistemas produtivos dos biocombustíveis.

Em qualquer caso, é fundamental reconhecer que, na proposição de programas consistentes para a produção e o uso de biocombustíveis, particularmente de bioetanol, em países onde essa tecnologia energética ainda inexiste, é imperativo que sejam realizadas avaliações e estudos prévios detalhados e abrangentes, para que se estabeleçam metas coerentes à base de recursos existentes. A bioenergia não é uma panacéia, pois não irá atender sozinha à demanda energética do mundo moderno e suas vantagens se potencializam em contextos específicos, como foi reiteradamente apresentado neste trabalho. Possivelmente, a maior recomendação nesse ponto seja valorizar a agregação de conhecimento e proceder a uma análise acurada das implicações energéticas, ambientais, econômicas e sociais.

Como conclusão, pode-se dizer que um mercado global para o bioetanol deverá ser uma realidade em poucos anos. Sua magnitude e abrangência entre os países dependerão de diversos elementos que ainda estão se delineando, tais como decisões políticas dos países em relação aos seus mercados internos, discussões sobre critérios de sustentabilidade, negociações de comércio internacional e reação da sociedade civil nos países em desenvolvimento e nos países industrializados, compondo uma equação complexa e dinâmica. Sem dúvida, o bioetanol apresenta um potencial global e, portanto, exige a cooperação mundial.

Capítulo 9

Uma visão de futuro para o bioetanol combustível

A sociedade moderna tem enfrentado o agravamento da degradação ambiental, ao mesmo tempo em que se dá conta da existência de limites em suas reservas de recursos naturais, sejam eles energia, água ou metais. Nesse quadro, a energia desempenha um papel central, impondo repensar com urgência as bases de um modelo de suprimento que apresenta sinais de esgotamento e buscar novos recursos que permitam dar continuidade ao processo de desenvolvimento socioeconômico. Como saída luminosa, no seio da escassez, volta a brilhar o sol, fonte de tantas energias e que ainda representa um dos poucos recursos subutilizados pela humanidade. Com efeito, apenas uma ínfima fração da radiação solar incidente no planeta é atualmente empregada mediante processos tecnológicos, embora exista um enorme potencial para sua utilização, que, entretanto, pressupõe rotas eficientes e competitivas para ser viabilizada. Nesse contexto, apresenta-se, então, a bioenergia como uma das melhores alternativas para captar e armazenar a energia solar, sempre que se disponha de terras livres, clima adequado (luz, água e temperatura) e, na mesma importância, conhecimento suficiente e disposição empreendedora para aplicá-lo. Nesse sentido, é oportuno lembrar a reflexão visionária de Henry Ford, publicada em 1934:

> I foresee the time when industry shall no longer denude the forests which require generations to mature, nor use up the mines which were ages in the making, but shall draw its raw material largely from the annual products of the fields. I am convinced that we shall be able to get out of the yearly crops most of the basic materials which we now get from forest and mine [Modern Mechanix (1934)].[1]

Especialmente apta para o suprimento de combustíveis veiculares, a energia solar na forma de bioetanol, produzido com eficiência e sustentabilidade, destaca-se entre todas as energias renováveis disponíveis e é capaz de atender às urgentes demandas para redução das emissões de gases de efeito estufa, melhorar a qualidade do ar nas metrópoles e competir em preço com as energias convencionais. Além disso, essa rota pode proporcionar uma nova dinâmica agroindustrial para os países tropicais com disponibilidade de terras e disposição para superar esquemas energéticos concentrados e ambientalmente problemáticos, conferindo segurança energética e trazendo novas perspectivas de crescimento econômico.

Nas páginas precedentes, procurou-se mostrar, com o detalhamento e a fundamentação possíveis no alcance do presente trabalho, como a produção de bioetanol de cana-de-açúcar, associada à geração de energia elétrica e à produção de alimentos e biomateriais, apresenta indicadores bastante interessantes de produtividade e corresponde, atualmente, à melhor alternativa disponível para utilizar trabalho, terra, água e sol na produção de biocombustíveis. Procurou-se mostrar também como essa alternativa energética ainda apresenta um bom potencial de aperfeiçoamento, pela valorização dos subprodutos e a racionalização dos processos agroindustriais, que poderão nos próximos anos superar os dez mil litros de etanol por hectare, sob uma reduzida demanda energética exógena e uma emissão de gases de efeito

1 "Eu prevejo o momento em que a indústria não mais derrubará florestas que levam gerações para crescer, nem utilizará produtos minerais que se formaram durante eras, mas buscará sua matéria-prima em grande parte a partir das colheitas agrícolas. Estou convencido de que seremos capazes de obter da agricultura a maior parte das matérias básicas que hoje recebemos das florestas e das minas."

estufa da ordem de um décimo do valor correspondente aos derivados de petróleo, para o mesmo efeito energético final.

A experiência brasileira nesse campo – de muitas décadas e um razoável acervo de erros e acertos, com centenas de unidades produtoras e milhões de veículos funcionando normalmente, abastecidos com um combustível que poucos meses antes era apenas água, gás carbônico na atmosfera e a luz do sol nas folhas de cana – pode e deve ser uma referência para outros países e contextos similares. São muitos os países em condições de adotar programas bioenergéticos eficientes, adequando o exemplo do Brasil a suas características, potenciais e mercados, mas que aparentemente ainda relutam e duvidam de que possam existir soluções tão interessantes.

Da mesma forma, muitos países têm buscado reduzir sua dependência energética, mitigar suas emissões de carbono e melhorar a qualidade do ar de suas cidades, mas, de modo geral, não incluem a utilização de bioetanol de cana-de-açúcar entre suas alternativas, erigindo barreiras que protegem rotas pouco eficientes e não-sustentáveis. Certamente, há muita desinformação e um conhecimento limitado das potencialidades do bioetanol de cana-de-açúcar, mesmo por parte dos decisores em temas energéticos e ambientais. Um dos principais objetivos do presente trabalho foi exatamente proporcionar uma informação mais consistente e objetiva sobre esse biocombustível.

Em síntese, são os seguintes os pontos mais importantes a destacar sobre o bioetanol de cana-de-açúcar, constatados concretamente e bem documentados com base na experiência de décadas no Brasil com esse biocombustível, que o configuram como uma opção energética estratégica e sustentável, passível de ser replicada e adaptada em outros países com disponibilidade de terras e condições edafoclimáticas adequadas:

1. O bioetanol pode ser utilizado em motores veiculares, puro ou em misturas com gasolina, com bom desempenho e empregando essencialmente o mesmo sistema de distribuição e armazenamento existente para a gasolina. Em teores até 10%, os efeitos do bioetanol são quase imperceptíveis sobre o consumo dos veículos, que podem, nesses níveis, empregar esse biocombustível em seus motores sem qualquer modificação.

2. O bioetanol de cana-de-açúcar é produzido com elevada eficiência na captação e na conversão de energia solar (relação produção/consumo de energia acima de oito), com produtividade agroindustrial bastante superior à dos demais biocombustíveis, alcançando perto de oito mil litros por hectare (tecnologia atual) e significativa disponibilidade de excedentes de interesse energético, como biocombustíveis sólidos (bagaço e palha) e, principalmente, bioeletricidade.

3

O bioetanol de cana-de-açúcar, produzido nas condições brasileiras, mostra-se competitivo com o petróleo ao redor de US$ 50 o barril, com um custo de produção determinado principalmente pela matéria-prima. A tecnologia empregada para sua produção está aberta e disponível e pode ser, aos poucos, introduzida na agroindústria canavieira voltada para a fabricação de açúcar.

4

Os impactos ambientais de caráter local associados à produção de bioetanol de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos, o solo e a biodiversidade e decorrentes do uso de agroquímicos, entre outros, podem ser e, em boa medida, foram efetivamente atenuados a níveis toleráveis, inferiores à maioria de outras culturas agrícolas.

5

O uso do etanol de cana-de-açúcar permite reduzir em quase 90% as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo de modo efetivo para mitigar a mudança climática. Nas condições atuais, para cada milhão de metros cúbicos de bioetanol de cana-de-açúcar empregado em mistura com gasolina, cerca de 1,9 milhão de toneladas de CO_2 deixam de ser emitidos para a atmosfera.

6

São significativas as perspectivas de desenvolvimento tecnológico na agroindústria do bioetanol de cana-de-açúcar, com aumento da produtividade e do desempenho energético (inclusive na fase agrícola) e diversificação da gama de produtos, com destaque para as rotas de hidrólise e gaseificação, passíveis de serem empregadas no incremento da produção de bioetanol e bioeletricidade. O desenvolvimento adequado de programas bioenergéticos depende visceralmente de sua permanente interação com as fontes de inovação.

7

Os empregos na agroindústria do bioetanol de cana-de-açúcar apresentam bons indicadores de qualidade e, ainda que a crescente mecanização na colheita da cana-de-açúcar reduza o trabalho braçal, a demanda de mão-de-obra permanece bastante elevada por unidade de energia produzida, em comparação com outras fontes energéticas.

8

A produção de bioetanol de cana-de-açúcar, como desenvolvida no Brasil, pouco afeta a produção de alimentos, com uma área plantada muito reduzida em relação à área cultivada para alimentos e às áreas disponíveis para a expansão das atividades agrícolas.

9

A agroindústria do bioetanol de cana-de-açúcar articula-se com muitos setores da economia e promove o desenvolvimento de diversas áreas, como a prestação de serviços, a indústria de equipamentos agrícolas e industriais e a logística. O suporte ao desenvolvimento científico e tecnológico é um elemento importante dessa cadeia produtiva, fundamental para assegurar a utilização da matéria-prima com baixo impacto ambiental e elevada eficiência.

10

São amplas as possibilidades de expandir a produção de bioetanol de cana-de-açúcar, não apenas no Brasil, como também em outros países tropicais úmidos, considerando a disponibilidade de terras não utilizadas ou utilizadas com atividades pecuárias de baixa produtividade e a existência de clima adequado.

Com efeito, boa parte das características do bioetanol de cana-de-açúcar ainda é insuficientemente conhecida e seria desejável que decisores públicos e privados e formadores de opinião recebessem informações corretas e pudessem assumir posições consistentes a respeito dessa cadeia energética. O bioetanol de cana-de-açúcar pode cumprir um papel relevante na matriz energética de muitos países, embora, pela relativa inovação que implica e pela diversidade das rotas bioenergéticas, seja compreensível que existam questionamentos, preconceitos e desinformações, que precisam ser superados.

Um aspecto essencial, ponto de partida para aprofundar o entendimento das potencialidades e limitações dos biocombustíveis, é reconhecer a importância do contexto produtivo. Muitos equívocos encontrados em estudos envolvendo as perspectivas para o bioetanol decorrem da visão simplista de que existe uma matéria-prima e um produto, quando, na verdade, como tratado no Capítulo 3, a produção de bioetanol de cana tem pouco a ver com a produção do mesmo etanol por meio de outros cultivos, sobretudo em relação aos indicadores de sustentabilidade mais importantes.

Um exemplo dessa limitada compreensão é o uso do termo "biocombustíveis de segunda geração" para designar os biocombustíveis produzidos por rotas ainda em desenvolvimento, especialmente com base em resíduos lignocelulósicos mediante processos como a hidrólise enzimática ou a gaseificação seguida de processos Fischer-Tropsch, como mostrado no Capítulo 5. Em diversos estudos e documentos, sugere-se que esses biocombustíveis serão os redentores da viabilidade da bioenergia (que poderá, então, ser considerada uma fonte energética moderna e sustentável), na medida em que serão competitivos economicamente, apresentarão boa relação entre a energia produzida e a demandada em sua produção, causarão reduzido impacto ambiental, com um bom potencial para mitigar a mudança climática e sem afetar a produção de alimentos, utilizando integralmente a matéria-prima. Ora, a rigor, como todos esses requisitos já estão atendidos de forma plena pelo bioetanol de cana-de-açúcar, não é necessário esperar por tecnologias ainda em bancada, cujos custos projetados

para serem alcançados a médio prazo são da mesma ordem dos custos atualmente já praticados na agroindústria canavieira nos países tropicais [IEA (2005)]. É interessante desenvolver novas tecnologias para o bioetanol, mas elas não são, em absoluto, imprescindíveis para que se promova desde agora seu uso de forma mais intensa.

Felizmente, a compreensão do alcance do bioetanol de cana-de-açúcar tende a se ampliar e, em alguns foros importantes, já se procura destacar esse biocombustível dos demais, indicando sua viabilidade e racionalidade. Em particular, documentos de agências internacionais são cada vez mais claros ao reconhecer que o fomento à produção de bioetanol por rotas ineficientes e a adoção de barreiras à importação do etanol de cana-de-açúcar pelos países desenvolvidos têm, na verdade, aumentado as distorções nos mercados energéticos e de bens agrícolas.

Pode-se citar, entre outros, um estudo da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), sobre o impacto dos biocombustíveis nos mercados agrícolas, no qual se afirma que:

> reduzir tais barreiras (incluindo a criação de normas internacionais para os biocombustíveis) não só permitiria aos países em desenvolvimento vender melhor seus produtos, mas também ajudaria os países importadores a cumprir os objetivos ambientais implícitos nas políticas nacionais de biocombustível, desde que os biocombustíveis sejam produzidos nos países exportadores de uma forma ambientalmente racional [OCDE (2007a)].

Também merecem ser mencionados o relatório anual do Fundo Monetário Internacional, no qual se procura mostrar como as barreiras interpostas à importação de biocombustíveis eficientes são nefastas para todos os países [IMF (2007)], e um informe do Programa ESMAP, do Banco Mundial, que recomenda a abertura do comércio internacional de biocombustíveis como forma de ampliar sua eficiência energética e ambiental [ESMAP (2007)].

No mesmo diapasão e com crescente clareza, manifesta-se o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), em seu Relatório de Desenvolvimento Humano 2007/2008:

> O comércio internacional poderia desempenhar um papel muito maior na expansão dos mercados de combustíveis alternativos. O Brasil é mais eficiente do que a União Européia ou os Estados Unidos na produção de etanol. Além disso, o etanol de cana-de-açúcar é mais eficiente na redução das emissões de carbono. O problema é que as importações de etanol brasileiro são restringidas pelas elevadas tarifas de importação. Removendo essas tarifas, seriam gerados ganhos não apenas para o Brasil, mas também para a mitigação das alterações climáticas [UNDP (2007)].

O Banco Mundial, em um documento sobre as saídas para a crise na oferta de alimentos, firmado por seu presidente, emite opinião semelhante:

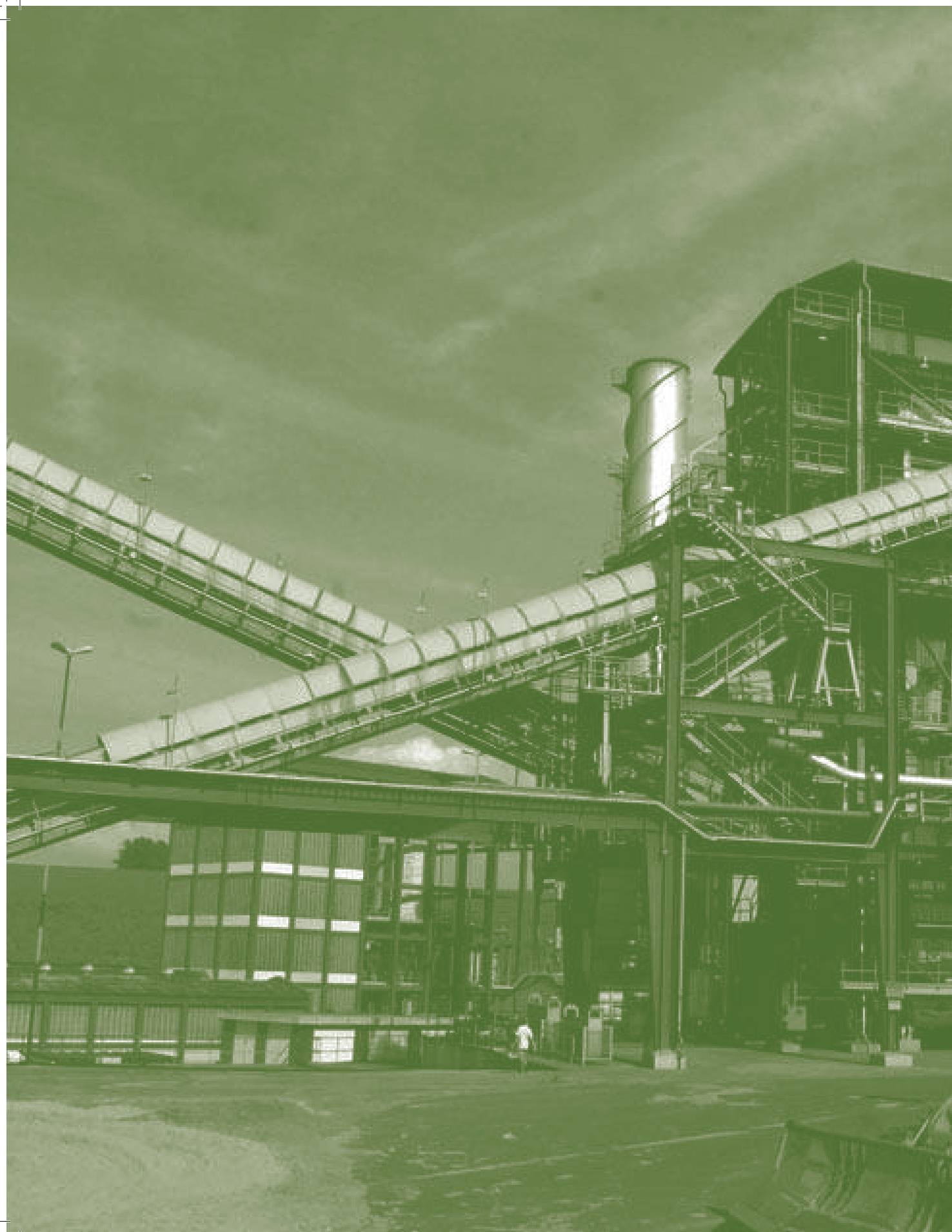
> Precisamos que a Europa e os Estados Unidos reduzam suas subvenções e barreiras aduaneiras que favorecem os biocombustíveis derivados do milho e sementes oleaginosas. Nos Estados Unidos, a utilização do milho para produzir bioetanol consumiu mais de 75% do aumento da produção global desse cereal, nos últimos três anos. Decisores políticos devem considerar "válvulas de segurança" que dificultem essas políticas, quando os preços são elevados. A escolha não tem de ser comida ou combustível. Cortes nas tarifas sobre etanol importado pelos mercados norte-americano e europeu iriam incentivar a produção mais eficiente de biocombustíveis de cana, que não concorrem diretamente com a produção alimentar, e aumentar as oportunidades para os países mais pobres, inclusive na África [World Bank (2008)].

A formação de mercados globais para o bioetanol e a ampliação de seus benefícios dependem muito de que essa correta compreensão da realidade se transforme em medidas efetivas.

Diretamente relacionados com a formação dos mercados vista acima e igualmente importantes para o desenvolvimento da produção dos biocombustíveis em bases sustentáveis, apontam-se como outros itens da agenda a integração e a coordenação das políticas nacionais, a realização de estudos de avaliação dos potenciais para produção de biocombustíveis, com clara identificação dos problemas, impactos negativos e vantagens de cada caso, que reforcem a capacitação dos decisores e promova uma articulação das políticas comerciais e de combate à mudança climática, na visão de um grupo de experientes estudiosos dos biocombustíveis [Best et al. (2008)].

É importante observar que a moderna agroindústria da cana-de-açúcar ainda apresenta grandes possibilidades de diversificação de seus produtos e incremento das disponibilidades energéticas. Com a utilização das tecnologias em desenvolvimento ou já em fase-piloto, caminha-se cada vez mais em direção às biorrefinarias, complexos produtivos capazes de fornecer bioenergia e biomateriais diversos, incluindo alimentos e plásticos biodegradáveis. Na mesma direção, os atuais estudos agronômicos com a finalidade de preservar e diversificar a base de germoplasma da cana-de-açúcar tendem a ganhar amplitude a partir dos estudos fundamentais sobre o processo fotossintético, ainda na fronteira do conhecimento e com interessantes perspectivas de incremento no desempenho energético e produtivo desse vegetal, que já é um dos mais eficientes na conversão da energia solar. A agroindústria da cana-de-açúcar está apenas começando a mostrar suas possibilidades.

Há, certamente, muito que fazer e desafios por superar para a expansão dos sistemas bioenergéticos, mas os benefícios serão proporcionais, pois um desenvolvimento energético saudável e consistente é determinante para consolidar uma nova relação entre a natureza e a sociedade. É com base nesse ponto de vista que a produção e o uso de bioetanol de cana-de-açúcar oferecem a perspectiva concreta de começar a construção de uma nova realidade energética, mais sustentável, que faça dessa agroindústria a alavanca de desejáveis transformações sociais e econômicas. O modelo brasileiro, aperfeiçoado por décadas e com novas possibilidades de se expandir com produtividade e eficiência, está à disposição dos países

que, por sua demanda de combustíveis, desejem reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e diversificar suas fontes de suprimento energético, ou que, por seu clima, seu solo e sua gente, poderão replicar com sucesso a produção eficiente de biocombustíveis, para uso e benefício de todos.

Anexo 1 – **Produção de cana e etanol anidro e hidratado no Brasil**

Ano	Produção de cana [milhão de t][1]	Produção de álcool etílico [103 m^3][2]	Produção de álcool hidratado [103 m^3][2]	Produção de álcool anidro [103 m^3][2]
1975	88,92	580	360	220
1976	102,77	642	370	272
1977	120,01	1.388	300	1.088
1978	129,06	2.248	399	1.849
1979	139,27	2.854	527	2.327
1980	146,23	3.676	1.501	2.175
1981	153,78	4.207	2.859	1.348
1982	186,38	5.618	2.091	3.527
1983	216,45	7.951	5.395	2.556
1984	241,39	9.201	7.059	2.142
1985	246,54	11.563	8.419	3.144
1986	238,49	9.983	7.863	2.120
1987	268,58	12.340	10.185	2.155
1988	258,45	11.523	9.837	1.686
1989	252,29	11.809	10.315	1.494
1990	262,60	11.518	10.669	849
1991	260,84	12.862	10.818	2.044
1992	271,43	11.766	9.540	2.226
1993	244,30	11.395	8.869	2.526
1994	292,07	12.513	9.715	2.798
1995	303,56	12.745	9.742	3.003
1996	325,93	14.134	9.701	4.433
1997	337,20	15.494	9.823	5.671
1998	338,97	14.121	8.438	5.683
1999	331,71	12.981	6.807	6.174
2000	325,33	10.700	5.056	5.644
2001	344,28	11.466	4.985	6.481
2002	363,72	12.588	5.548	7.040
2003	389,85	14.470	5.638	8.832
2004	416,26	14.648	6.789	7.859
2005	419,56	16.040	7.832	8.208
2006	457,98	17.764	9.851	7.913

Fonte: [1] IBGE; [2] BEN 2007.

Anexo 2A – Área plantada em cana no Brasil

Ano	Brasil		
	Produção (mil t)	Área colhida (mil ha)	Rendimento médio (t/ha)
1990	262.674	4.273	61,5
1991	260.888	4.211	62,0
1992	271.475	4.203	64,6
1993	244.531	3.864	63,3
1994	292.102	4.345	67,2
1995	303.699	4.559	66,6
1996	317.106	4.750	66,8
1997	331.613	4.814	68,9
1998	345.255	4.986	69,2
1999	333.848	4.899	68,1
2000	326.121	4.805	67,9
2001	344.293	4.958	69,4
2002	364.389	5.100	71,4
2003	396.012	5.371	73,7
2004	415.206	5.632	73,7
2005[1]	455.272	6.172	73,8

Anexo 2B – Área plantada nos principais estados produtores

Ano	Maiores estados produtores									
	São Paulo		Paraná		Alagoas		Minas Gerais		Pernambuco	
	Produção	Área colhida	Produção	Área colhida	Produção	Área colhida	Produção	Área colhida	Produção	Área colhida
1990	137.835	1.812	11.736	159	26.151	559	17.533	298	22.818	467
1991	136.200	1.852	12.219	172	22.214	484	17.583	276	23.505	467
1992	145.500	1.890	13.571	186	22.669	448	17.354	272	25.199	488
1993	148.647	1.896	13.694	190	12.922	323	15.743	261	14.347	363
1994	174.100	2.173	15.946	216	21.740	439	16.212	262	19.259	400
1995	174.960	2.259	20.430	256	21.573	450	16.726	268	20.665	418
1996	192.320	2.493	23.468	285	20.754	432	13.331	247	18.784	401
1997	194.025	2.446	24.564	300	24.850	450	16.262	279	20.765	421
1998	199.783	2.565	26.642	310	28.524	461	16.918	279	19.622	402
1999	197.144	2.555	27.106	338	26.860	451	17.557	280	12.253	323
2000	189.040	2.485	23.192	327	27.798	448	18.706	291	15.167	304
2001	198.932	2.567	27.424	338	28.693	456	18.975	294	15.977	339
2002	212.707	2.661	28.083	359	25.171	438	18.231	278	17.626	348
2003	227.981	2.818	31.926	374	27.221	416	20.787	303	18.522	359
2004	239.528	2.952	32.643	400	26.284	423	24.332	335	19.015	364
2005[1]	266.071	3.285	34.882	437	23.991	397	31.587	424	18.832	370

Fonte: Produção, área e rendimento médio: IBGE – Produção Agrícola Municipal (PAM – 1990 a 2004) e Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA - julho/2006). Elaboração: Secretaria de Política Agrícola – Mapa (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Anuário, 2005.
Nota: [1] Estimativa.

***Anexo 3* – Preço do etanol pago ao produtor em São Paulo**

Ano (semestre)	Álcool anidro (R$/litro)	Álcool hidratado (R$/litro)
2000 (2)	0,668678	0,749999
2001 (1)	0,629092	0,716373
2001 (2)	0,623336	0,706785
2002 (1)	0,584636	0,503122
2002 (2)	0,6228	0,543285
2003 (1)	0,913213	0,783303
2003 (2)	0,653644	0,559895
2004 (1)	0,521573	0,454482
2004 (2)	0,832212	0,713184
2005 (1)	0,803179	0,70349
2005 (2)	0,883684	0,774705
2006 (1)	1,070215	0,998262
2006 (2)	0,908019	0,795583
2007 (1)	0,850049	0,763721
2007 (2)	0,719413	0,634066

Fonte: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea). <http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>.
Nota: Em junho de 2003, os Indicadores de Álcool Cepea/Esalq passaram a utilizar o CDI (Certificado de Depósito Interbancário) para o desconto das negociações a prazo e não mais a NPR. A partir da semana de 6 a 10 de maio de 2002, os indicadores semanais de álcool anidro e de álcool hidratado combustíveis Cepea/Esalq passaram a ser calculados sem nenhum imposto (ICMS, PIS/Cofins ou Cide).

Referências

ABIOVE. *Estatísticas do Complexo da Soja*. Associação Brasileira das Indústrias de Óleo Vegetal. Disponível em: www.abiove.com.br. Acesso em: março de 2008.

ABRANTES, R. et al. "Caracterização das emissões de aldeídos de veículos do ciclo diesel". *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 39 (3), 2002.

ADEN, A. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover.* Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2002 (Technical Report NREL TP-510-32438).

AEROÁLCOOL. *Vantagens do uso do álcool em motores aeronáuticos.* Disponível em: http://www.aeroalcool.com.br/vantagens.htm. Acesso em: abril de 2008.

AGÊNCIA FAPESP. *Notícias sobre etanol.* Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp). Disponível em: http://www.agencia.fapesp.br/. Acesso em: abril de 2008.

AKIYAMA, M. et al. "Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation". *Polymer Degradation and Stability*, v. 80, 2003.

ALEXANDER, M, *Ethanol Africa: clean maize fuel*. Sustainable Development, 2005. Disponível em: http://www.southafrica.info/about/sustainable/ethanol-120905.htm. Acesso em: junho de 2008.

ALMEIDA, E. F. et al. *The performance of Brazilian biofuels: an economic, environmental and social analysis.* Rio de Janeiro: Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

ALVES, F. "Por que morrem os cortadores de cana?". *Saúde e Sociedade*, São Paulo, v. 15 (3), 2006.

AMYRIS. "Amyris and Crystalsev join to launch innovative renewable diesel from sugarcane by 2010". *Amyris Press Release*, abr. 2008.

ANDERSSON, P. & VICTORIN, K. *Inhalation of ethanol: literature survey and risk assessment*. Estocolmo: Institutet for Miljomedicin (Institute of Environmental Medicine), Karolinska Institute, 1996 (IMM Rapport 3/96).

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração*. Disponível em: http://www.aneel.gov.br. Acesso em: março de 2008.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira*. São Paulo: Anfavea, 2008.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Preços dos combustíveis*. Disponível em: http://www.anp.gov.br/index.asp. Acesso em: dezembro de 2007.

______. *Qualidade dos combustíveis*. Disponível em: http://www.anp.gov.br/index.asp. Acesso em: fevereiro de 2008.

Antonil, A. J. *Cultura e opulência do Brasil*. Belo Horizonte: Itatiaia, 1982.

Apace Research. *Intensive field trial of ethanol/petrol blends in vehicles.* Apace Research Ltd, EDRC Project 211, Australia,1998.

API – American Petroleum Institute. *Alcohols and ethers, a technical assessment of their application as fuel and fuel components*. Washington: American Petroleum Institute, 1998 (API Publication 4.261).

______. *Shipping ethanol through pipelines.* American Petroleum Institute. Disponível em: http://www.api.org/aboutoilgas/sectors/pipeline/. Acesso em: novembro de 2007.

Apla – Asociación Petroquímica y Química Latinoamericana. *Álcool é solução para indústria química*. Asociación Petroquímica y Química Latinoamericana. Disponível em: http://www.apla.com.ar/petroquimica2/mostrar.php?&id=3679. Acesso em: junho de 2006.

Arrigoni, E. D. B. & Almeida, L. C. "Defensivos (pesticidas e outros)". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

Assocana – Associação Rural dos Fornecedores e Plantadores de Cana da Média Sorocabana. *Custo médio operacional da lavoura da cana-de-açúcar*. Assis: Assocana, 2008.

Autoalliance. *Worldwide Fuel Chart*. 4ª ed. Ecea, Alliance, EMA, Jama, set. 2006.

Babu, S. P. *Observations on the current status of biomass gasification.* International Energy Agency (IEA) Task 33: Thermal gasification of Biomass, 2005.

Babu, S. P. & Hofbauer, H. "Status and prospects of biomass gasification". *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion Conference (STCBC)*, ago. 2004.

Balaji, R. *Oil cos in a bind gasohol supply.* Calcutá: Business Line (The Hindu Group), 2002.

Balsadi, O. V. "Mercado de trabalho assalariado na cultura da cana-de-açúcar no Brasil no período 1992-2004". *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 37, n. 2, fev. 2007.

Baumol, W. J. "Contestable markets: an uprising in the theory of industry structure". *American Economic Review*, v. 72, 1982.

Berndes, G. et al. "The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies". *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (1), 2003.

Bertelli, L. G. *"A verdadeira história do Proálcool – Programa Nacional do Álcool". O Estado de S. Paulo*, 30.10.2007.

Bertoncini, E. I. "Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar". *Workshop: Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar*. Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.

Best. *Bioethanol for Sustainable Transport*. Disponível em: http://www.best-europe.org/. Acesso em: março de 2008.

Best, G. et al. *A sustainable biofuels consensus*. Bellagio: Rockefeller Foundation, Bellagio Center, abril 2008.

BFS/FAO. "Second FAO Technical Consultation on Bioenergy and Food Security". *Summary Proceedings*, Roma, fev. 2008.

Bias – Baylor Institute for Air Science. *Development of renewable aviation fuels*. Baylor Institute for Air Science, Baylor University. Disponível em: http://www.baylor.edu/bias. Acesso em: setembro de 2006.

Biocycle. Disponível em: http:// www.biocycle.com.br. Acesso em: março de 2008.

Blanco-Canqui, H. & Lal, R. "Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production". *Geoderma*, v. 141, 2007.

BNDES. *BNDES aprova financiamento de R$ 1,5 milhão para apoio a pesquisa de inovação em etanol*. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/noticias/2007/not194_07.asp. Acesso em: dezembro de 2007.

Branco, G. M. "Motores diesel: ecológicos ou poluidores?". *ECOinforme*, set. 2004.

Brasil. *Decreto 19.717, Obrigatoriedade da adição de álcool à gasolina de procedência estrangeira*. Rio de Janeiro, 20.2.1931.

Brusstar, M. & Bakenhus, M. *Economical, high efficiency engines technologies for alcohol fuels*. US Environmental Protection Agency, 2005.

Burnquist, W. L. & Landell, M. "O melhoramento genético convencional e a disponibilidade de variedades". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

CALVO, Guillermo. *Exploding commodity prices, lax monetary policy, and sovereign wealth fund*. VOX, 20 de junho de 2008.

CANAVIALIS. *Melhoramento genético*. Disponível em: http://www.canavialis.com.br/. Acesso em: março de 2008.

CARBOGÁS. *Produção de CO_2 de grau alimentar*. Disponível em: http://www.carbogas.ind.br. Acesso em: março de 2008.

CARVALHO, E. *Perspectivas da agroenergia*. São Paulo: Unica, 2007.

CARVALHO, P. A. "Informações pessoais". Rio de Janeiro: Superintendência de Qualidade de Produtos, Agência Nacional do Petróleo, 2003.

CASTRO, M. H. M & SCHWARTZMAN, S. *Tecnologia para a indústria: a história do Instituto Nacional de Tecnologia* [1981]. Disponível em: http://www.schwartzman.org.br/simon/. Acesso em: abril de 2008.

CAVALCANTI, E. *Importância da qualidade do álcool etílico combustível*. Apresentado no "I Seminário sobre Tecnologia para Pequena Produção de Álcool", Confederação Nacional da Agricultura, Brasília, 2007.

CAVALCANTI, F. C. B. *Transformando competências em casos de sucesso: a Oxiteno e o desenvolvimento de tecnologia nacional em catalisadores*. Anais do "XII Congresso Brasileiro de Catálise", Sociedade Brasileira de Catálise, 2005.

CBD – CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. *Recommendations*. Convention on Biological Diversity. Disponível em: http://www.cbd.int/recommendations/?rec=XII/7. Acesso em: abril de 2008.

CDM – CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: http://cdm.unfccc.int/index.html. Acesso em: abril de 2008.

CEPAL – COMISSÃO ECONÔMICA PARA AMÉRICA LATINA E O CARIBE. *Fuentes Renovables de energia en América Latina y el Caribe: dos años después de la Conferencia de Bonn*. Santiago de Chile: Proyecto Cepal/GTZ, Comissão Econômica para América Latina e o Caribe, 2007.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Preços de etanol anidro e hidratado*. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em: http://cepea.usp.br. Acesso em: abril de 2008.

CERRI, D. G. P. *Agricultura de precisão em cana-de-açúcar: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005 (Tese de Doutoramento).

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Redução da queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, mar. 2008.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 1*. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2005.

______. *Estudo prospectivo de solo, clima e impacto ambiental para o cultivo da cana-de-açúcar e análise técnica/econômica para o uso do etanol como combustível – Etanol Fase 3*. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007a.

______. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2*. Campinas: Nipe/Unicamp e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007b.

______. *Informações aos autores*. Campinas: Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2008.

CHEVRONTEXACO CORP. *Motor Gasolines/ Oxygenated Gasoline*. Disponível em: http://www.chevron.com/prodserv/fuels/bulletin/motorgas/ch4.shtml. Acesso em: julho de 2006.

CMAI – CHEMICAL MARKET ASSOCIATED INC. *Petrochemical demand growth tracks economic growth*. Chemical Market Associated Inc., 2005.

CNPAB. *Fixação biológica de nitrogênio em plantas não leguminosas*. Embrapa Agrobiologia. Disponível em: http://www.cnpab.embrapa.br/pesquisas/fbnnl.html. Acesso em: abril de 2008.

COELHO, S. T. et al. *A expansão da cultura canavieira no Estado de São Paulo*. Apresentado no "VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético", Salvador, maio de 2008.

CONCAWE. *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Concawe, Eucar, European Commission, Versão 2007c, março de 2007. Disponível em: http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW. Acesso em: maio de 2008.

CONSONNI, S. & LARSON, E. D. "Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles: Part A – Technologies and performance modeling". *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996a.

______. "Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles: Part B – Performance calculations and economic assessment". *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996b.

Cortez, L. A. B. *A expansão da produção de álcool como programa de desenvolvimento nacional*. Apresentado no âmbito do "Projeto Etanol", Brasília, CGEE/Nipe, 2007.

Cresesb/UFPE/Chesf. *Atlas solarimétrico do Brasil.* Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf). Recife: UFPE, 2000.

CTC – Centro de Tecnologia Copersucar. *Diagrama de fases água/gasolina/etanol*. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar (atualmente Centro de Tecnologia Canavieira), 1998.

______. *Síntese do controle mútuo agroindustrial*. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2005.

______. *Projetos e Pesquisas*. Centro de Tecnologia Canavieira. Disponível em: http://www.ctc.com.br/. Acesso em: abril de 2008.

Cunha, F. *A logística atual de transporte das distribuidoras e a infra-estrutura para a exportação de álcool*. Petrobras Distribuidora, ago. 2003 (apresentação em Power Point).

Dai, D. et al. "Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China". *Energy Conversion and Management*, v. 47, 2006.

Dedini. *DHR Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini Indústrias de Base. Disponível em: http://www.dedini.com.br/pt/pdf/dhr.pdf. Acesso em: março de 2008.

Demeyer, A. et al. *La conversion bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies*. Paris: Technique et Documentation, 1985.

Dias Leite, A. *A energia do Brasil*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

Dipardo, J. *Outlook for biomass ethanol production and demand*. Washington: Energy Information Administration, Department of Energy, 2000.

DOE – Department of Energy. *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda*, Report DOE/SC-0095, Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy. Disponível em: http://www.doegenomestolife.org/biofuels/. Acesso em: junho de 2006.

DOE/USDA. *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply*. Washington: Department of Energy, US Department of Agriculture, 2005.

Donzelli, J. L. "Uso de fertilizantes na produção de cana-de-açúcar no Brasil". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005a.

______. "Erosão na cultura da cana-de-açúcar: situação e perspectivas". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005b.

Dröscher, M. *Kunststoffe: Werkstoffmärkte und Prognosen*. Kongress Zukunft der Werkstoff, Oberhausen, Frauenhofer Institut, set. 2006.

DuPont. *BioButanol*. Disponível em: http://www2.dupont.com/Biofuels/en_US/index.html. Acesso em: maio de 2008.

EBAMM. *ERG Biofuels Analysis Meta-Model*. Release 1.0, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, 2005.

Ecoinvest. Informações aos autores. Empresa de investimentos e desenvolvimento de projetos MDL, abr. 2008.

EIA – Energy Information Administration. *Petroleum Statistics*. Energy Information Administration, Department of Energy. Disponível em: http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/info_glance/petroleum.html. Acesso em: março de 2008.

El Sayed, M. A. et al. *Production of ethanol from sugar beet (Appendix Q)*. Carbon and Energy Balance for a Range of Biofuels Options, DTI Project B/B6/00784, Londres, 2005.

Elia Neto, A. "Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

______. *Meio ambiente e setor sucroalcooleiro*. "Canasul 2007, I Congresso da Cadeia Produtiva da Cana-de-Açúcar em Mato Grosso do Sul", Campo Grande, 2007.

EPFL – École Polytechnique Fédérale de Lausanne. *The roundtable on sustainable biofuels: ensuring biofuels deliver on their promise of sustainability*. Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. Disponível em: http://cgse.epfl.ch/page65660.html. Acesso em: abril de 2008.

ERS – Economic Research Service. *Global agricultural supply and demand: factors contributing to the recent increase in food commodity prices*. Washington: Economic Research Service, Department of Agriculture, 2008 (Report WRS-0801).

ESMAP – Energy Sector Management Assistance Programme. *Potential for biofuels for transport in developing countries*. Washington: Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2005.

______. *Considering trade policies for liquid biofuels*. Washington: Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2007.

Ethanolbus. *Ethanol buses in Sweden*. Disponível em: http://www.ethanolbus.com/. Acesso em: março de 2008.

European Commission. *Council Regulation (EC) nº 980/2005*. Bruxelas: European Commission, jun. 2005.

Exame. "A nova fronteira do etanol". *Portal Exame*, 20.9.2007. Disponível em: http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/0902/economia/m0138746.html. Acesso em: junho de 2008.

F. O. Licht. *World Ethanol Markets: Outlook to 2015*. Kent: F. O. Licht, 2006.

______. *World Sugar Yearbook 2007*. Kent: F. O. Licht, 2007.

______. "Cogeneration may be the next big story for the Brazilian sugar industry". *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (13), mar. 2008 (2008a).

______. "Ghana: Sekab to source ethanol from Northern Sugar in 2010-20". *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (17), maio 2008 (2008b).

Faaij, A. P. C. et al. *Long term perspectives of Biomass Integrated Gasification/Combined Cycle Technology: costs and electrical efficiency*. Utrecht: Novem/Department. of Science, Technology and Society, Utrecht University, 1998.

Faaij, André & Domac, Julije. "Emerging international bio-energy markets and opportunities for socio-economic development". Energy for Sustainable Development, v. X, n. 1. p. 7-19, 2006.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Climdata Rainfall Database*. Roma: United Nations Food and Agriculture Organization, Sustainable Development Department, Agrometeorology Group, 1997.

______. *Wood Energy Information System (WEIS)*. Preliminary report. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Forestry Department, 2001.

______. "World agriculture: towards 2015/2030". In: Bruinsma, J. (ed.). *An FAO perspective*. Londres: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Earthscan Publications, 2003.

______. *Global Forest Resources Assessment 2005*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

______. *Sugar: global market analysis*. Food Outlook. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007a.

______. *What is food security*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007b.

______. *Soaring food prices: facts, perspectives, impacts and actions required.* Document HLC/08/INF/1, abr. 2008, apresentado na "High-Level Conference on World Food Security: The Challenge of Climate Change and Bioenergy", Roma, 3- 5 de junho.

FAOSTAT. *Sugar cane production*. Disponível em: http://faostat.fao.org. Acesso em: março de 2008 (2008a).

______. *Food commodities prices*. Disponível em: http://faostat.fao.org. Acesso em: abril de 2008 (2008b).

______. *Bioenergy and Food Security Project (BEFS)*. Disponível em: http://www.fao.org/nr/ben/befs/. Acesso em: maio de 2008 (2008c).

Fapesp. *Brazil world leader in sugarcane and ethanol knowledge and technology (Fapesp´s contribution)*. São Paulo: The State of São Paulo Research Foundation, 2007.

Fargione, J. et al. "Land clearing and the biofuel carbon debt". *Science*, v. 319 (5.867), 2008.

Farrell, A. E. et al. "Ethanol can contribute to energy and environmental goals". *Science*, v. 311 (27), 2006.

Faurès, J. M. *Competition for natural resources: the case of water*. "II FAO Consultation on Bioenergy and Food Security", FAO, Roma, 2008.

FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. *Liquid biofuels for transportation in Brazil*. Projeto GTZ/FBDS. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2005.

Fernandes, A. C. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar.* 2ª ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003.

Frankel, Jeffrey. *The effect of monetary policy on real commodity prices.* Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2006 (Working Paper, 12.713).

______. *An explanation for soaring commodity prices*. VOX, 25 de março (2008a).

______. *Monetary policy and commodity prices.* VOX, 29 de maio (2008b).

FRIE, C. et al. *White paper: sustainable biofuels program: the need for biofuel certification/labelling*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

FUREY, R. L. *Volatility characteristics of gasoline-alcohol and gasoline-ether fuel blends*. Society of Automotive Engineers, 1985 (SAE Paper 852116).

FURTADO, A. T. et al. *O sistema de inovação da agroindústria canavieira brasileira*. Apresentado no "VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético", Salvador, maio de 2008.

GALBE, M. & ZACCHI, G. "A review of the production of ethanol from softwood". *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 59, 2002.

GAZETA MERCANTIL. "Etanol vai ter padrão mundial em 2008", *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 7.2.2008.

GNANSOUNOU, E. et al. *The Context of the Southern Africa Development Community (SADC)*. Sustainable Liquid Biofuels for Transport, Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, nov. 2007. Disponível em: http://lasen.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/Sustainable_Liquid_Biofuels_for_Transport-SADC.pdf. Acesso em: junho de 2008.

GAVA, G. J. C. et al. "Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40 (7), 2005.

GBEP. *A review of the current state of bioenergy development in G8 + 5 countries*. Disponível em: http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2007. Acesso em: abril de 2008.

GENENCOR INTERNATIONAL INC. "Genencor celebrates major progress in the conversion of biomass to ethanol ". *Focus on Catalysts*, dez. 2004.

GLOBAL BIOFUELS CENTER. Informações aos autores por KLEIN, T. [diretora executiva], 2008. Disponível em: http://www.ifqcbiofuels.org/.

GOLDEMBERG, J. *Brazilian Energy Initiative*. Apresentado no "World Summit on Sustainable Development", Johannesburgo, set. 2002.

GOLDEMBERG, J. & MACEDO, I. C. "The Brazilian Alcohol Program – An overview". *Energy for Sustainable Development*, v. 1 (1), 1994.

GOLDEMBERG, J. et al. "The sustainability of ethanol production from sugarcane". *Energy Policy*, v. 36 (4), 2008.

GOLDEMBERG, J. et al. "Ethanol learning curve: the Brazilian experience". *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (3), 2004.

GOLDEMBERG, J. et al. "The Brazilian Fuel-Alcohol Program". In: JOHANSSON, T. B. et al. (eds.). *Renewable energy: sources for fuels and electricity*. Washington: Island Press, 1993.

GOMES, M. G. F. M. "Experiência da Petrobras no transporte de etanol carburante". *Revista Opiniões*, número especial sobre logística no setor sucroalcooleiro, abr.-jun. 2008.

GOODLAND, R. et al. (eds.). *Population, technology, and lifestyle: the transition to sustainability*. Nova York: Island Press, 1992.

GPC – GLOBAL PETROLEUM CLUB. *Oil from algae*. Global Petroleum Club. Disponível em: http://www.globalpetroleumclub.com. Acesso em: fevereiro de 2008.

GRABOWSKI, P. *Biomass termochemical conversion: OBP efforts*. Washington: Office of Biomass Program, 2004.

GRAF, A. & KOEHLER, T. *Oregon cellulose-ethanol study: An evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks*. Salem: Oregon Office of Energy, jun. 2000.

GRAY, K. A. et al. "Bioethanol". *Current Opinion in Chemical Biology*, v. 10, 2006.

GUILHOTO, J. J. M. "Geração de emprego nos setores produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool no Brasil e suas macro-regiões". Relatório *Cenários para o setor de Açúcar e Álcool*. São Paulo: MB Associados e Fipe, 2001.

GUIMARÃES, M. et al. *Energia da biomassa – Alavanca de uma nova política industrial.* Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, Ministério da Indústria e Comércio, 1986.

HALL, D. O. et al. "Visão geral de energia e biomassa". In: ROSILLO-CALLE, F. et al. (orgs.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. Campinas: Unicamp, 2005.

HALL, D. O. & RAO, K. *Photosynthesis*. 6ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

HAMELINCK, C. N. *Outlook for advanced biofuels*. Utrecht: Universiteit Utrecht, 2004 (PhD Thesis).

HAMELINCK, C. N. et al. *Production of FT transportation fuels from biomass: process analysis and optimisation, and development potential*. Utrecht: Copernicus Institute, Utrecht University, 2003 (Report NWS-E-2003-08).

HAMELINCK, C. N. et al. *Future prospects for the production of methanol and hydrogen from biomass*. Utrecht: Science, Technology and Society/Utrecht University, 2001.

HAMELINCK, C. N. et al. "Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term". *Biomass and Bioenergy*, v. 28 (4), 2005.

Hasegawa, M. & Furtado, A. T. "Avaliação dos impactos de programas de P&D". (Um estudo do ProCana). *Inovação Uniemp*, Campinas, v. 2 (3), 2006.

Hassuani, S. J. et al. *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: PNUD-CTC, Série Caminhos para Sustentabilidade, 2005.

Heck, J. *Cogeração de eletricidade a partir do bagaço de cana*. Cia. Açucareira Vale do Rosário, 2006.

Hoogwijk, M. et al. "Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy". *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (2), 2003.

Horta Nogueira, L. A. *Perspectivas de un Programa de biocombustibles en América Central*. Cidade do México: Proyecto Cepal/GTZ Uso Sustentable de Hidrocarburos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2004.

______. *Costos y precios para etanol en Centro América*. Cidade do México: Proyecto Cepal/Gobierno de Italia, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2006a.

______. *Ethanol as fuel in Brazil (small distilleries and use of ethanol as cooking fuel)*. Belo Horizonte: Projeto Gaia, Winrock Fundation e Banco do Povo, 2006b.

______. *Biocombustíveis na América Latina: situação atual e perspectivas*. São Paulo: Cadernos do Memorial da América Latina, 2007.

______. *Sustainable woodfuel production in Brazil*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

Howeler, R. *Cassava in Asia: present situation and its future potential in agro-industry*. Bangcoc: CIAT Cassava Office for Asia, Departament of Agriculture, 2003.

Ibama – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Proconve – Programa de Controle das Emissões Veiculares*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/proconve. Acesso em: novembro de 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios 2004, microdados Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005 (CD-ROM, 2005).

______. *Censo Agropecuário 2006* (Dados preliminares). Disponível em: http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/. Acesso em: abril de 2008.

ICRISAT – INTERNATIONAL CROPS RESEARCH INSTITUTE FOR THE SEMI-ARID TROPICS. *Icrisat develops sweet sorghum for ethanol production*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2004. Disponível em: http://www.icrisat.org/media/2004/media13.htm. Acesso em: maio de 2006.

IDEA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO AGROINDUSTRIAL. *Digital Usinas – Cadastro Nacional de Unidades Sucroalcooleiras*. Ribeirão Preto: Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, 2007.

______. "X Seminário de Mecanização e Produção de Cana-de-Açúcar". Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, Ribeirão Preto, 2008.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Biofuels for transport: an international perspective*. Paris: International Energy Agency, 2004.

______. *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency, 2007.

______. *Sustainable international bioenergy trade*. International Energy Agency. Disponível em: www.fairtrade.org. Acesso em: março de 2008.

IEA BIOENERGY. *Potential contribution of bioenergy to the world's future energy demand*. Paris: International Energy Agency, 2007 (IEA Bioenergy Task 40).

IEL/SEBRAE. *O novo ciclo da cana: estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos*. Brasília: Instituto Euvaldo Lodi/Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2005.

IFPRI – INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. *A 2020 vision for food, agriculture, and the environment, International Food Policy Research Institute*. Washington: International Food Policy Research Institute, 2006.

IIED. *The multilateral trade and investment context for biofuels: Issues and challenges*. Sophia Murphy Institute for Agriculture and Trade Policy, dez. 2007. Disponível em: http://www.iatp.org/. Acesso em: maio de 2008.

ILLOVO. *International Sugar Statistics*. Illovo Sugar, 2008. Disponível em http://www.illovosugar.com/worldofsugar. Acesso em: março de 2008.

IMF – INTERNATIONAL MONETARY FUND. "Making the most of biofuels". *World Economic Outlook*. Washington: International Monetary Fund, 2007.

INDIA INFOLINE. *Sugar*. Disponível em: http://www.indiainfoline.com/sect/suin/ch07.html. Acesso em: março de 2008.

Inovação Unicamp. "Oxiteno apresenta projeto ao BNDES para construir biorrefinaria; quer obter etanol a baixo custo para fabricar produtos químicos" [2006]. Disponível em: http://www.inovacao.unicamp.br/report/news oxiteno060807.shtml. Acesso em: março de 2008.

______. "Diretor-executivo da Ridesa conta a história e o que faz a maior rede de pesquisa universitária em melhoramento genético da cana-de-açúcar" [2007]. Disponível em: http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/entre-marcosridesa070522.php. Acesso em: dezembro de 2007.

______. "Empresas asiáticas investem US$ 170 mi na produção de lisina: componente de ração animal multiplica por sete valor do açúcar" [2008]. Disponível em: http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-lisina.shtml. Acesso em: março de 2008.

Inpe – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. Estimativas anuais desde 1988 até 2007, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/prodes/. Acesso em: abril de 2008.

Instituto Florestal. *Situação atual dos remanescentes da cobertura vegetal natural do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.

Iowa Corn. "How our corn crop was used in 2005-06". Disponível em: http://www.iowacorn.org. Acesso em: março de 2008.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007 – Synthesis Report*. Genebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, Unep, 2008.

ISA – Instituto Socioambiental. *Desmatamento na Amazônia e agronegócio.* Instituto Socioambiental, 2008. Disponível em: http://www.socioambiental.org/nsa/detalhe?id=2357. Acesso em: maio de 2008.

Janick, J. *Sugarcane*. Tropical Horticulture, Purdue University. Disponível em: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/tropical/lecture_21/sugarcane_R.html. Acesso em: dezembro de 2007.

Jank, M. *Outlook for Brazilian ethanol technologies*. São Paulo: Unica, 2007.

Janssens, M. J. J. et al. *The role of photosynthesis and bio-productivity on bioenergy yields.* Bonn: University of Bonn, Institute of Crop Science and Resource Conservation, 2007.

Jin, H. et al. *Performance and cost analysis of future, commercially-mature gasification-based electric power generation from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, nov. 2006.

Jornal do Commercio. "Coperbo: uma idéia feliz e adequada ao seu tempo". Disponível em: http://www2.uol.com.br/JC/_1999/80anos/80d_29.htm. Acesso em: dezembro de 1999.

JornalCana. "Alltech reúne 400 produtores do Brasil e do mundo e anuncia início de atividades de fábrica de U$ 25 milhões no Paraná". JornalCana, 8.9.2005.

Joseph Jr., H. *Ethanol fuel: vehicular application technology*. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, 2005.

______. *Flex fuel technology in Brazil*. São Paulo: Anfavea, Energy and Environment Division, 2007.

Juergens, I. "Can biofuels make a significant contribution to sustainable energy supply?". *Biofuels – Global Issues*, The Foundation for Science and Technology, maio 2007.

Junginger, M. et al. "A growing role: opportunities, challenges and pitfalls of the biofuels trade". *Renewable Energy World*, 2007.

Karlsson, M. *Integrated forest biorefinery*. "Latin America European Union Biofuels Research Workshop", Campinas , 2007.

Keese, W. J. *Transition from methyl tertiary-butyl ether to ethanol in California*. Washington: (Chairman of California Energy Commission), Congress of the United States, House of Representatives, Committee on Government Reform, Subcommittee on Energy Policy, Natural Resources and Regulatory Affairs, jul. 2003.

Koisumi, T. *Biofuel policies in Asia*. "FAO Expert Meetings 5 and 6", Roma, fev. 2008.

Lamonica, H. M. *Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça*. Apresentado no "VI Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – Agrener 2006", Nipe, Unicamp, 2006.

Landell, M. "ProCana – O Programa Cana-de-Açúcar do Instituto Agronômico". *O Agronômico*, Campinas, v. 55 (1), 2003.

Larson, E. D. et al. *Large-scale gasification-based co-production of fuels and electricity from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, mar. 2006.

Larson, E. D. et al. *Gasification based liquid fuels and electricity from biomass with carbon capture and storage*. Apresentado na "IV Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration", Alexandria, 2005.

LARSON, E. D. et al. "A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba". *Energy for Sustainable Development*, v. V (1), 2001.

LEAL, M. R. L. V. *Importância do álcool combustível na matriz energética brasileira*. Apresentado no *workshop* "Álcool de Bagaço de Cana-de-Açúcar", Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, fev. 2005.

______. "The potential of sugarcane as an energy source". *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, v. 26, 2007.

______. *Informações aos autores*, 2008.

LEITE, R. C. C. *Proálcool, a única alternativa para o futuro*. Campinas: Unicamp, 1990.

LORA, E. S. "Thermodynamics limits for the production of ethanol and electricity from sugarcane". *Zuckerindustrie*, v. 131 (11), 2006.

LOWCVP. *Well-to-wheel evaluation for production of ethanol from wheat*. A Report by the LowCVP Fuels Working Group, WTW Sub-Group, Low Carbon Vehicle Partnership, Londres, 2004.

LUCON, O. *Aspectos ambientais na cadeia de biocombustíveis*. Apresentado no *workshop* "Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar", Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.

LUENGO, J. M. et al. "Bioplastics from microorganisms". *Current Opinion in Microbiology*, v. 6, 2003.

LYND, L. R. *Tomorrow's biomass refineries*. Apresentado no "XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals", Golden, Colorado, 2005.

LYND, L. R. et al. "Likely features and costs of mature biomass ethanol technology". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 57/58, 1996.

MACEDO, I. C. "The sugar cane agro-industry and its contribution to reducing CO_2 emissions in Brazil". *Biomass and Bioenergy*, v. 3 (2), 1992.

______. "Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996)". *Biomass and Bioenergy*, v. 14 (1), 1998.

______. (coord.). *Sugar cane's energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability.* São Paulo: Unica, 2005.

______. *Biomass as a source of energy*. Relatório preparado para o InterAcademy Council Study on "Transitions to Sustainable Energy Systems", set. 2005.

______. "Cana-de-açúcar e energia renováveis no Brasil: a perspectiva tecnológica". *Revista Opiniões*, número especial sobre as energias renováveis, abr.-jun. 2007.

______. Informações aos autores, 2008.

Macedo, I. C. & Horta Nogueira, L. A. "Balanço de energia na produção de açúcar e álcool nas usinas cooperadas". *Boletim Técnico Copersucar*, v. 31/85, 1985.

______. "Biocombustíveis". *Cadernos NAE 2*, Brasília, Centro de Gestão de Estudos Estratégicos e Núcleo de Assuntos Estratégicos (CGEE/NAE), 2005.

______. *Tecnologia e ciência para o desenvolvimento sustentável da bioenergia em São Paulo: cana-de-açúcar e outros vetores bioenergéticos*. Documento preparado para a "Comissão Especial de Bioenergia do Estado de São Paulo", São Paulo, ago. 2007.

Macedo, I. C. et al. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, abr. 2004.

Macedo, I. C. et al. *Geração de energia elétrica e de gás de síntese a partir de gaseificação de biomassa*. Funcamp/Unicamp-Nipe/LH2 e Petrobras/Cenpes-Finep, nov. 2006.

Macedo, I. C. et al. "Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020". *Biomass and Bioenergy,* v. 32 (4), 2008.

Mandioca Brasileira. *Sistema de Informações Agroindustriais da Mandioca Brasileira*. Disponível em: http://www.mandioca.agr.br. Acesso em: março de 2008.

Mapa – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Balanço nacional de cana-de-açúcar e agroenergia*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2007.

______. *Cronologia da mistura carburante (álcool anidro – gasolina)*. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2008.

Martinot, E. *Renewables 2007 Global Status Report*. REN 21 Network, 2007. Disponível em: http://www.martinot.info/RE2007_Global_Status_Report.pdf. Acesso em: abril de 2008.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia. *Mudanças climáticas*. Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008. Disponível em: http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/3881.html. Acesso em: março de 2008.

Mears, M. *Ethanol Transportation & Distribution*. Magellan Midstream Holdings, apresentação em Power Point para Governors Ethanol Coalition, 2007.

Meirelles, A. J. A. *Expansão da produção de bioetanol e melhoria tecnológica da destilação alcoólica*. Campinas: Unicamp, 2006.

Milanez, A. Y. et al. *Perspectivas para o etanol brasileiro*. Rio de Janeiro: Departamento de Biocombustíveis/BNDES, 2008.

MME – Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2008/ano base 2007*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, 2008.

Modern Mechanix, *Henry Ford discusses America's Industrial Future*, dez. 1934.

Molin, J. P. "Agricultura de precisão em cana-de-açúcar é mais do que uma realidade". *Revista Coplana*, Guariba, jan. 2008.

Moraes, M. A. F. D. "Número e qualidade dos empregos na agroindústria da cana-de-açúcar". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005.

______. "O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades". *Economia Aplicada*, Ribeirão Preto, v.11 (4), 2007.

Moreira, J. R. *Water use and impacts due ethanol production in Brazil*. "Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries International Conference", Hyderabad, International Water Management Institute and Food and Agriculture Organization of the United Nations, jan. 2007.

Moreira, J. R. & Goldemberg, J. "Política energética no Brasil". *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 19 (55), 2005.

Nastari, P. "Estrangeiros dobram participação em açúcar e álcool no Brasil". Entrevista à agência Reuters, 25.9.2007.

______. *O mercado de etanol*. Apresentado no "I Simpósio Internacional de Combustíveis, Biocombustíveis e Emissões", Datagro, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo, maio de 2008.

Native. *Projeto Cana Verde*. Disponível em http://www.nativealimentos.com.br/cana_verde. Acesso em: maio de 2008.

NCGA – National Corn Growers Association. *Fossil energy use in the manufacture of corn ethanol*. National Corn Growers Association, 2008. Disponível em: http://www.ncga.com. Acesso em: março de 2008.

Neiva Embraer. *Aeronave Ipanema – Vantagens do motor a álcool.* Disponível em: http://www.aeroneiva.com.br/site/content/produtos/produtos_ipanema_vant_alc.asp. Acesso em: março de 2008.

Nguyen, T. L. T. et al. "Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand". *Energy Policy*, v. 35 (9), 2007.

NIST – National Institute of Standards and Technology. *White paper on internationally compatible biofuels standards*. National Institute of Standards and Technology, 2008. Disponível em: http://www.nist.gov/public_affairs/biofuels_report.pdf. Acesso em: março de 2008.

Nonato, R. V. "Plástico biodegradável a partir de açúcar". Apresentado no "V Workshop Internacional Brasil-Japão em Biocombustível, Meio Ambiente e Novos Produtos da Biomassa", Campinas, 2007.

Nonato, R. V. et al. "Integrated production of biodegradable plastic, sugar and ethanol". *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 57, 2001.

Novozymes. *Fuel ethanol production: technological and environmental improvements*. Novozymes & BBI International, 2002.

NYBOT – New York Board of Trade. *Sugar prices – Contract No. 11*. New York Board of Trade, 2008. Disponível em: http://www.nybot.com/. Acesso em: janeiro de 2008.

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. *Agricultural market impacts of future growth in the production of biofuels*. Paris: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2007a.

______. *Economic survey of the European Union 2007: reforming agricultural and trade support*. Paris: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2007b.

Olade – Organización Latinoamericana de Energía. *Sistema de Informaciones Económicas y Energéticas (SIEE)*. Quito: Organización Latinoamericana de Energía, 2006.

Ondrey, G. "The path to biorefineries". *Chemical Engineering*, v. 113 (4), 2006.

Orbital Engine Company. *A literature review based assessment on the impacts of a 10% and 20% ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines*. Orbital Engine Company, relatório para Environment Australia, 2002.

Ortolan, M. C. A. *Relacionamento entre indústrias e fornecedores: mercado atual e futuro*. Apresentado no "I Congresso de Tecnologia na Cadeia Produtiva em Mato Grosso do Sul", Canasul 2007, Campo Grande, 2007.

Owen, K. & Coley, T. *Automotive fuels reference book*. 2ª ed. Nova York: Society of Automotive Engineers, 1995.

Pádua Rodrigues, A. Informações pessoais. Unica, nov. 2006.

Pesquisa Fapesp. "Riqueza nas sobras das usinas". *Revista Pesquisa Fapesp*, v. 76, jun. 2002.

Petrobras. *Produtos e Serviços – composição de preços, cadeia de comercialização e composição dos preços da gasolina e do óleo diesel no Rio de Janeiro*. Disponível em: http://www2.petrobras.com/produtos _serviços/. Acesso em: abril de 2008.

Philippidis, G. P. & Smith, T. K. "Limiting factors in the simultaneous saccharification and fermentation process for conversion of cellulosic biomass to fuel ethanol". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 51/52, 1995.

Phillips, S. et al. *Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis of lignocellulosic biomass*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2007 (Technical Report TP-510-41168).

Pimentel, D. & Patzek, T. W. "Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower". *Natural Resources Research*, v. 14 (1), 2005.

Pires, A. "Bicombustíveis serão 32% dos carros no Brasil em três anos". Centro Brasileiro de Infra-Estrutura, entrevista publicada em diversos jornais, Rio de Janeiro, 26.4.2007.

Pizaia, W. *Steam economy improvement*. Relatório RLT-025 para MCT/PNUD. Projeto BRA/96/G31, Geração de Energia Elétrica por Biomassa, Bagaço de Cana-de-Açúcar e Resíduos, Brasília , 1998.

Pordesimo, L. O. et al. "Distribution of aboveground biomass in corn stover". *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (4), 2004.

ProCana. *Conheça o setor: dados da safra 2006/07*. Disponível em: http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/. Acesso em: março de 2008.

Ragauskas, A. J. et al. "The path forward for biofuels and biomaterials". *Science*, v. 311, jan. 2006.

Rauch, R. *Biomass gasification to produce synthesis gas for fuel cells, liquid fuels and chemicals*. Technology Brief, IEA Bioenergy Agreement – Task 33: Thermal Gasification of Biomass, 2002.

REFUEL. *Eyes on the track, mind on the horizon (from inconvenient rapeseed to clean wood: a European road map for biofuels)*. Disponível em: http://www.refuel.eu/refuel-project/. Acesso em: maio de 2008.

REN21. *Renewables 2007 Global Status Report*. Washington: Worldwatch Institute, 2008.

RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. *Annual Industry Outlook 2008*. Renewable Fuels Association, 2008. Disponível em: http://www.ethanolrfa.org. Acesso em: fevereiro de 2008.

RICCI JR., A. "Proteção de nascentes e cursos de água". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.* São Paulo: Unica, 2005a.

______. "Defensivos: herbicidas". In: MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.* São Paulo: Unica, 2005b.

RICUPERO, R. "Mais comida – e muitos mais comensais". *O Estado de S. Paulo*, Caderno Aliás, 4 de maio de 2008.

RIDESA. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Disponível em: http://www.ridesa.org.br/. Acesso em: fevereiro de 2008.

RIRDC – RURAL INDUSTRIES RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION. *Sugar beet preliminary feasibility of ethanol production from sugar beet in NE Tasmania*. Canberra: Department of Primary Industries, Water and Environment, Rural Industries Research and Development Corporation, Australian Government, 2007.

RISSARDI JR., D. J. & SHIKIDA, P. F. A. "A agroindústria canavieira do Paraná pós-desregulamentação: uma abordagem neoschumpeteriana", *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 45 (2), 2007.

RODRÍGUEZ, A. G. "Seguridad alimentaria y biocombustibles". In: *Biocombustibles como energía alternativa: una mirada hacia la región*. Quito: Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental, 2007.

______. *Análisis de los mercados de materias primas agrícolas y de los precios de los alimentos.* Santiago de Chile: Unidad de Desarrollo Agrícola/Cepal, ago. 2008 (Documento de Trabajo).

______. "Information on biofuel commodity prices (based on World Bank data)". In: CEPAL. *Unidad de desarrollo agricola*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2008.

Rossell, C. E. V. & Olivério, J. L. *Produção de álcool a partir do bagaço: o processo DHR – Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini S/A Indústrias de Base, Piracicaba, mar. 2004.

Rossetto, R. "A cultura da cana, da degradação à conservação". *Visão Agrícola*, Esalq-USP, ano 1, 2004.

Sachs, I. *Brasil: desafios da energia para o desenvolvimento sustentável*. Palestra proferida no Memorial da América Latina, São Paulo, mar. 2007.

Salih, F. M. & Andrews, G. E. *The influence of gasoline/ethanol blends on emissions and fuel economy*. "Society of Automotive Engineers Fuel and Lubricants Meeting", San Francisco, 1992 (SAE Paper 922378).

Scandiffio, M. I. G. *Análise prospectiva do álcool combustível no Brasil – Cenários 2004–2024*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005 (Tese de Doutorado).

Scania. "*New highly efficient diesel-ethanol engine – ready to cut fossil CO_2 emissions by 90%*" *Scania Press Info*, P07503EN, maio 2007.

Scaramucci, J. A. & Cunha, M. P. "Aspectos sócio-econômicos do uso energético da biomassa de cana-de-açúcar". In: Cortez, L. A. B. & Lora, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 3ª ed. Campinas: Unicamp (no prelo).

Schuchardt, U. et al. "A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria prima?". *Química Nova*, v. 24, n. 2, 2001, pp. 247-251.

Scientific American Brasil. "Mistura em pleno vôo: depois de inovar com o avião a álcool, país desenvolve motor aeronáutico flex fuel". *Scientific American Brasil*, n. 44, jan. 2006.

Seabra, J. E. A. *Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Tese de Doutoramento).

Seabra, J. E. A. & Macedo, I. C. *Demanda de energia para a produção de PHB a partir do açúcar da cana*. Relatório preparado para PHB Industrial S.A., Campinas, 2006.

Serôa da Motta, R. & Ferreira, L. R. "The Brazilian National Alcohol Programme: an economic reappraisal and adjustments". *Energy Economics*, jul. 1988.

Silvestrin, C. R. *Dependência Elétrica de São Paulo: Desafios & Oportunidades*. São Paulo: Cogen-SP, Secretarias de Desenvolvimento e de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo, março de 2007.

SMA – Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. "Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola". *Norma Técnica Cetesb P4.231*, Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2005.

Smeets, E. et al "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050". *Progress in Energy and Combustion Science*, doi:10.1016/j.pecs.2006.08.001, 2006.

Smeets, E. et al. *Sustainability of Brazilian bio-ethanol*. Utrecht/Campinas: Copernicus Institute/Utrecht University, Universidade Estadual de Campinas, 2006 (Report NWS-E-2006-110).

Smil, V. *General energetics: energy in the biosphere and civilization*. Nova York: Wiley, 1991.

Soares, M. L. Q. *Direitos humanos, globalização e soberania*. Belo Horizonte: Inédita, 1997.

Soares, R. A. B. *Uso da agricultura de precisão na Usina Jalles Machado*. Apresentado no "Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – Conbap 2006", Piracicaba, 2006.

Sopral – Sociedade de Produtores de Açúcar e de Álcool. *Avaliação de caminhões e tratores a álcool*. Coleção Sopral 3. São Paulo: Sociedade de Produtores de Açúcar e de Álcool, 1983.

SOW-VU. *China's rapidly growing meat demand: a domestic or an international challenge?* Amsterdam: Centre for World Food Studies, 2007.

Souza, S. A. V. "Disponibilidade e uso de água no Brasil: irrigação". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005a.

______. "Vinhaça: o avanço das tecnologias de uso". In: Macedo, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo: Unica, 2005b.

Steenblik, R. *Liberalising trade in "environmental goods": some practical considerations*. Paris: OCDE, 2005 (OECD Trade and Environment Working Paper No. 2005-05).

Strapasson, A. "Governo prepara estudo para mapear áreas adequadas para plantio de cana-de-açúcar em grande escala" [Informações prestadas na nota]. *Inovação Unicamp*, 10 de março de 2008.

Sun, Y. & Cheng, J. "Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review". *Bioresource Technology*, v. 83, 2002.

Szmrecsányi, T. *O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-1975)*. São Paulo: Hucitec, 1979.

SZWARC, A. Informações aos autores. Unica, abril de 2008.

TEIXEIRA, C. G. et. al. "Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em micro-destilaria". *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.17 (3), 1997.

TEREOS. *Bio-ethanol*. Disponível em: http://www.tereos.com, Acesso em: maio de 2006.

THE HOUSE OF COMMONS. "Are biofuel sustainable?". *First Report of Session 2007–08*, Environmental Audit Committee, Londres, 2008.

TOYOTA. *Support for diversification of alternative fuels*. Toyota Technology, 2007. Disponível em: http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/powertrain/. Acesso em: novembro de 2007.

TRINDADE, S. *Fuel ethanol issues in thailand: ethanol production, stillage disposal and market penetration*. Report to UN/DTCD (draft), Nova York, 1985.

TROSTLE, Ronald. *Global agricultural supply and demand: factors contributing to the recent increases in food commodity prices*. Washington, D.C.: Economic Research Services, United States Department of Agriculture, maio de 2008 (WRS-0801).

TSB – TRANSPORTATION SYSTEMS BRANCH. *Use of higher than 10 volume percent ethanol/gasoline blends in gasoline powered vehicles*. Ottawa: Transportation Systems Branch, Air Pollution Prevention Directorate, Environment Canada, 1998.

TURKENBURG, W. C. et al. "Renewable energy technologies". In: GOLDEMBERG, J. (ed.). *World energy assessment of the United Nations*. Capítulo 7. Nova York: UNDP, Undesa/WEC. UNDP, 2000.

TURNER, T. "Biofuels, agriculture and the developing world". In: *Linking trade, climate change and energy*. Genebra: ICTSD, 2006. Disponível em: http://www.trade-environment.org/output/ictsd/resource/Energy_issuebriefs.pdf. Acesso em: abril de 2008.

ULATE, W. *Perspectivas de uso actual y futuro de etanol carburante en Costa Rica*. San José: Refineria Costarricense de Petróleo, 2006.

UNDP – UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM. *Human development report 2007/2008 – Fighting climate change: human solidarity in a divided world*. Nova York: United Nations Development Program, 2007.

UN-ENERGY. *Sustainable bioenergy: a framework for decision makers*. Nova York: United Nations, 2007. Disponível em: http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf. Acesso em: maio de 2008.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. *Working papers 2007*. United Nations Environmental Program, 2008. Disponível em: www.unep.org. Acesso em: março de 2008.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Kyoto Protocol*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008. Disponível em: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php, Acesso em: abril de 2008.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. *Produção e uso do etanol combustível no Brasil: respostas às questões mais freqüentes*. São Paulo: União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007.

______. *Estatísticas*. União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2008. Disponível em: http://www.portalunica.com.br. Acesso em: janeiro de 2008.

UNITED NATIONS. *Our common future*. Nova York: World Commission on Environment and Development, 1987.

UPME – UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. *Los biocombustibles en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Energía y Minas, Unidad de Planeación Minero Energética, 2006.

URQUIAGA, S. et al. *A importância de não queimar a palha na cultura da cana-de-açúcar*. Seropédica: Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Biologia do Solo, 1991.

USDA – UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Data and Statistics*. United State Department of Agriculture, 2008. Disponível em: http://www.usda.gov. Acesso em: fevereiro de 2008.

VAN DER LAAN, G. P. *Kinetics, selectivity and scale up of the Fischer-Tropsch Synthesis*. Groningen: University of Groningen, 1999 (Tese de Doutorado).

VARGAS, M. *História da técnica e da tecnologia no Brasil*. São Paulo: Unesp, 1994.

VENTURI, P. & VENTURI, G. "Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems". *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (3), 2003.

VIEIRA, M. C. A. et al. *Setor sucroalcooleiro brasileiro: evolução e perspectivas*. Rio de Janeiro: Deagro/BNDES, 2006.

WALTER, A. C. S. & ENSINAS, A. *Produção de eletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar*. Apresentado no *workshop* "Abimaq", Ribeirão Preto, 2006.

WALTER, A. C. S. & HORTA NOGUEIRA, L. A. "Produção de eletricidade a partir da biomassa". In: CORTEZ, L. A. B. & LORA, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 2ª ed. Manaus: Universidade do Amazonas, 2007.

WASTE ONLINE. *Plastics recycling information sheet*. Disponível em: http://www.wasteonline.org.uk. Acesso em: fevereiro de 2008.

WERPY, T. A. et al. *Top value added chemicals from biomass*. Apresentado no "XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels", Golden, Colorado, 2005.

WHIMS, J. *Pipelines considerations for ethanol*. Sparks Companies, Inc., Agricultural Marketing Resource Center, Kansas State University, 2002.

WHITE HOUSE. New Energy Act 2007. Disponível em: http://www.whitehouse.gov/news/releases/2007/12/20071219-1.html. Acesso em: abril de 2008.

WILLIAMS, R. H. et al. *Low-carbon liquid fuel and electricity from coal and crop residues with CO_2 capture and storage*. Apresentado no GCEP International Workshop (Stanford University, Tsinghua University and Zheijiang University), Beijing, 2005.

WOLF, J. et al. "Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy". *Agricultural Systems*, v. 76 (3) 2003.

WOOLEY, R. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol – Process prehydrolysis and enzymatic hydrolysis – Current and futuristic scenarios*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1999 (Report TP-580-26157).

WORLD BANK, *Rising food prices: Policy options and World Bank response*. Washington: World Bank, 2007a.

______. *World Development Report 2008*. Washington: World Bank, 2007b.

______. *A 10-point plan for the food crisis*. Washington: World Bank, 2008.

WYMAN, C. E. *Handbook on bioethanol: production and utilization*. Applied Energy Technology Series. Washington: Taylor & Francis, 1996.

______. "What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol". *Trends in Biotechnology*, doi:10.1016/j.tibtech.2007.02.009, 2007.

YACOBUCCI, B. D. "Ethanol imports and the Caribbean Basin Initiative". *CRS Report for Congress*, 2006.

YACOBUCCI, B. D. & WOMACH, J. "Fuel ethanol: background and public policy issues". *CRS Report for Congress*, n. RL30369, Summary, 21 fev. 2002.

ZACCHI, G. *The state of the art and future trends of ligno-cellulose biomass conversion to ethanol*. Apresentado na Unicamp, Campinas, fev. 2007.